Über den Einfluß der Vorgeschichte auf verschiedene Eigenschaften des Bleies.

Inaugural-Dissertation

der hohen philosophischen Fakultät (II. Sektion)
der Königl. Bayrischen Ludwig-Maximilians-Universität
zu München

zur Erlangung der Doktorwürde

vorgelegt am 28. Februar 1913

von

Paul Knipping

aus Neuwied am Rhein.

ACAD.
LUGD.BAT.
BIBL.

Borna-Leipzig
Buchdruckerei Robert Noske
1913.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548309_0148

Inhaltsverzeichnis.

Seite

Einleitung 1

1. Teil: Biegungsversuche.

1. Kapitel: Vorarbeiten, Störungen 1

2. Kapitel: Der neue Biegungsapparat 7

3. Kapitel: Biegungsversuche an Bleistäbchen.

A. Nicht endgültige Versuche, Fehler und deren Abstellung, Beobachtungsmethode 18

B. Endgültige Messungen der elastischen Nachwirkung bei $t = +8^{\circ}, -80^{\circ}, -185^{\circ}$ C. 33

4. Kapitel: Einfluß der Vorgeschichte auf die elastische Nachwirkung 37

Zusammenfassung 45

2. Teil: Mikrostruktur des Bleies 46

3. Teil: Dichteänderungen 55

4. Teil: Dämpfung bei Torsionsschwingungen 57

Schluß: Zusammenstellung der Resultate 64

Einleitung.

In der vorliegenden Arbeit ist der Versuch unternommen, Zusammenhänge zwischen der Vorgeschichte und verschiedenen Eigenschaften des Bleies aufzudecken.

Es war zu Anfang der Studien, welche sich, verschiedentlich unterbrochen, vom Sommer 1907 bis Anfang 1911 erstreckten, eigentlich beabsichtigt, die Temperaturabhängigkeit des Youngschen Moduls (Y. M.) von diversen Materialien — voran einiger Metalle — speziell bei tiefen Temperaturen zu bestimmen. Begonnen wurde mit Biegungsversuchen, und zwar wurde zunächst Blei untersucht. Es zeigten sich bei ihm mancherlei merkwürdige Erscheinungen, welche es gerechtfertigt erscheinen ließen, vom Studium der übrigen in Aussicht genommenen Materialien abzusehen und das Augenmerk ausschließlich dem Blei zu widmen.

Erster Teil.

Biegungsversuche.

Erstes Kapitel.

Vorarbeiten, Störungen.

Zu den Vorversuchen diente ein vorhandener älterer Biegungsapparat von Herrn Lissauer,[1]) gebaut zu dem Zweck, den Y. M. einer Quarz- und einer Turmalinplatte bei Zimmertemperatur und der Temperatur der flüssigen Luft zu bestimmen. Die Durchbiegung des zu untersuchenden Stäbchens ließ sich aus der Lage von Interferenzstreifen bestimmen, welche zwischen diesem Stäbchen und einer festen Glasplatte zustande kamen. Der Biegungs-

[1]) Diss. München 1907.

apparat befand sich in einer am Zeißschen Dilatometerstativ [1]) aufgehängten Kapsel, welche von den betreffenden Temperaturbädern umgeben war. Leider erwies sich der Apparat für meine Zwecke als untauglich, denn er war außerordentlich empfindlich gegen Erschütterungen, welche im Institut selbst oder draußen ihre Quelle hatten. Fast unausgesetzt vibrierten die Interferenzstreifen, häufig so stark, daß man im Fernrohr nur mehr eine gleichmäßig beleuchtete Fläche sah. Besonders arg störte neben den Arbeiten beim Neubau der Universität, der unmittelbar neben dem Institut liegt und gerade zu jener Zeit errichtet wurde, der Betrieb der Straßenbahn, und zwar in solchem Maße, daß lange Zeit hindurch der Fortgang der Arbeit überhaupt in Frage gestellt war.

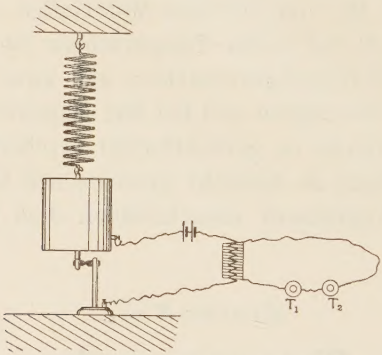


Fig. 1.

Es sei mir gestattet, wegen der Wichtigkeit dieser **Straßenbahnstörungen** bei meiner Arbeit und zum Nutzen der Forscher, welche unter ähnlichen Umständen oder mit ähnlichen Apparaten zu tun haben, an dieser Stelle wenigstens das Wichtigste der diesbezüglichen Untersuchungen einzuschieben: Durch ein improvisiertes Vertikalseismoskop (Fig. 1) mit Mikrophonkontakt und zwei Telephonhörern ließ sich leicht feststellen, daß der Erdboden fast fortwährend von ungefähr 130 Erschütterungswellen pro Sekunde durchzogen wurde, die ganz enorme Intensität [2])

[1]) Z. f. I.-K. 13. 1893. p. 365, 401, 437.

[2]) Die Breite des schraffierten Bandes ist ein Maß für die Lautstärke

(Fig. 2) erreichten, wenn gerade ein Straßenbahnwagen in der Flucht der Grundmauern vorbeifuhr, die sich vom Institut nach der Ludwigstraße hinziehen (Entfernung ca. 100 m). Es zeigte sich, daß die Vibrationen mit den sogen. Riffeln im Zusammenhang stehen, jenen kleinen Erhebungen, welche die abgenutzten Schienen senkrecht zur Fahrtrichtung bedecken (s. Fig. 3). Denn aus ihrem Abstand und der Geschwindigkeit des darüberfahrenden Wagens ergab sich die bereits genannte Zahl von ungefähr 130 Stößen pro Sekunde.

Über die Herkunft der Riffeln war nichts Sicheres in Erfahrung zu bringen. Der gleichmäßige Riffelabstand deutet darauf hin, daß sich irgendwo schwingende Teile befinden. Nicht

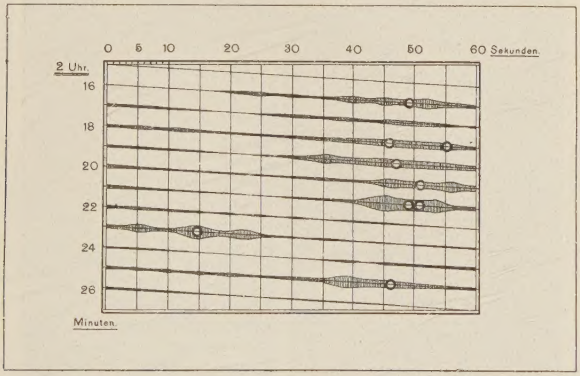


Fig. 2.

unwahrscheinlich sind Torsionsschwingungen, welche die Achse mit ihren Rädern ausführt, und die durch ungleichen Umfang der starr mit der Achse verbundenen Räder angeregt werden. Eine Überschlagsrechnung unter Zugrundelegung wahrscheinlicher Werte für Dimensionen der Achse und Trägheitsmomente ergab denn auch Schwingungszahlen ungefähr von der Größenordnung 100 pro Sekunde. Indessen bin ich durch genaueres Studium der Schienenoberfläche zu der Vermutung gelangt, daß diese Torsionsschwingungen nicht die Hauptrolle spielen. Es scheint vielmehr, daß diese ihrerseits wieder andere Schwingungen

---

im Telephon. Die Kreise kennzeichnen das Durchfahren der Wagen in der Flucht der Grundmauern.

zur Folge haben, daß nämlich das Drehgestell des Wagens (und zwar in Folge seiner eigenartigen Abfertigung — s. Fig. 4) Auf- und Abschwingungen oder aber Pendelschwingungen um eine horizontale oder auch vertikale Achse, die durch den „Lenkzapfen“ geht, ausführt. Aber es könnten auch noch andere Quellen für die Schwingungen in Betracht kommen, auf die hier nicht eingegangen werden kann.

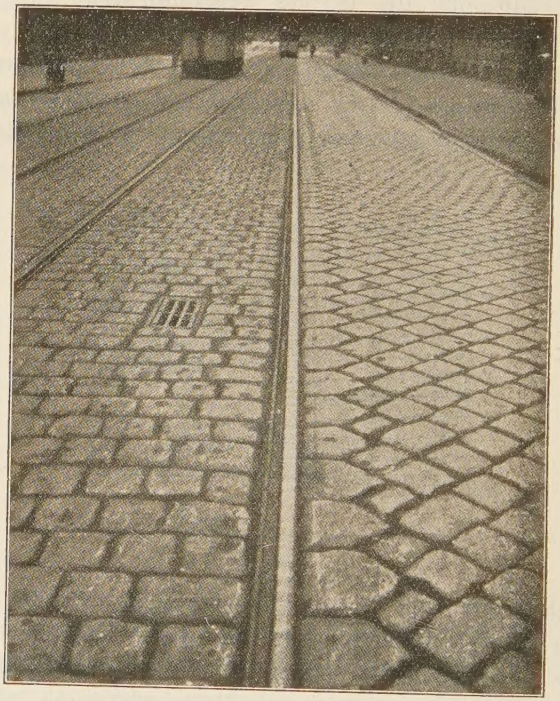


Fig. 3.

Da die Wagen so ziemlich die gleiche Bauart aufweisen, so senden sie alle Schwingungen von ungefähr gleicher Periode aus. Tritt dann noch Resonanz ein, dann können die Stöße so heftig werden, daß sie sich, wie in meinem Fall, noch in weiter Entfernung vom Ursprungsort höchst unliebsam bemerkbar machen. Die Anfangsriffeln scheinen vielfach ihren Ausgang von den Schienenverbindungen zu nehmen; sie treten zunächst unmittel-

bar hinter den Schienenstößen auf und verbreiten sich von dort in der Fahrtrichtung über die ganze Schienenoberfläche.

Ich darf mir wohl den Hinweis erlauben, daß beim Neubau von wissenschaftlichen Instituten bezw. beim Verlegen neuer Straßenbahnlinien in der Nähe dieser auf die Riffelfrage Rücksicht genommen werden müßte. Es wäre vor allem zu fordern, daß die Schienen in nachgiebiger Grundlage verlegt werden.

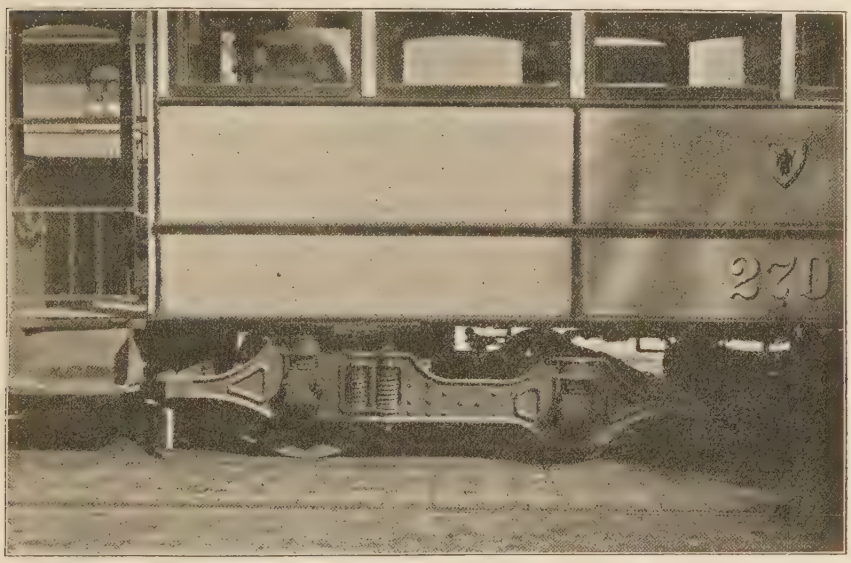


Fig. 4.

In meinem Falle, unter den gegebenen ungünstigen Bedingungen, konnte es sich nur darum handeln, die Erschütterungen nach Möglichkeit vom Apparat fernzuhalten. Gummifüße und Filzunterlagen brachten zwar den gewünschten Erfolg. Da man aber dabei dem Apparat die feste Basis entzog, war er wackelig, so daß man ihn nicht mehr anrühren durfte. Nach längeren und nutzlosen Versuchen kam ich auf den einzig möglichen Ausweg: man brauchte nur eine kleine Spiralfeder (O in Fig. 10) zwischen das „Belastungsgewicht“ und das zu belastende Stäbchen einzuschalten, um jene Störungen, wenn auch nicht vollkommen zu unterdrücken,

so doch in dem Maße zu dämpfen, daß die Beobachtung der Interferenzstreifen wenigstens nicht mehr unmöglich war. Durch diesen Kunstgriff wurde offenbar das schwingungsfähige System des Biegungsapparates aus der Resonanzlage gebracht, die es wohl vordem innegehabt oder in dessen Nähe es sich befunden hatte.

Nachdem so die von außen kommende Störung verringert und ein einigermaßen ersprießliches Arbeiten ermöglicht war, stellte sich eine weitere Einwirkung der Erschütterungen heraus: diese veranlaßten ein (in der Regel einseitiges) Wandern der Interferenzstreifen und damit fehlerhafte Messungen. Diese Unannehmlichkeit wurde später durch Aufstellung der Apparate im Keller (s. S. 28) und durch nächtliches Beobachten unschädlich gemacht.

Außerdem ergab sich, daß dem Apparat selbst noch ein schwerwiegender Mangel anhaftete, der nicht zu beheben war. Er besaß mehrere Stellen, die sich nicht auf die Dauer absolut abdichten ließen, so daß Gase in sein evakuiertes Innere eindrangen. So wurden durch Änderung des Brechungsindex des Mediums, in dem die Interferenzstreifen zustande kamen, Streifenverschiebungen hervorgerufen,[1]) welche die Resultate in unkontrollierbarer Weise fälschten. Gleichwohl benutzte ich ihn einige Zeit zu den Vorversuchen bei Zimmertemperatur, um mir die notwendige Geschicklichkeit in seinem Gebrauch anzueignen. Besonders die Justierung war schwierig. Es wurde der Y.M. einer früher von anderer Seite untersuchten Stahlplatte bestimmt und gefunden, daß sich bei vorsichtiger Behandlung des Apparates die Fehler auf etwa 1 % herunterdrücken ließen. Auch wurde weiterhin versucht, den Apparat für die Messungen bei tiefen Temperaturen instand zu setzen.

---

[1]) Pulfrich, Z. f. I.-K. 13. 1893. p. 455.

Zweites Kapitel.

Der neue Biegungsapparat.

Als es sich jedoch trotz vieler darauf verwendeter Mühe zeigte, daß so nicht weiter zu kommen war, wurde der schon lange gehegte Plan in die Wirklichkeit umgesetzt, einen neuen Apparat zu bauen. Von demselben wurde verlangt, daß er im Intervall von + 100° bis — 185° C gebrauchsfähig, bei diesen Temperaturen absolut dicht, in allen Teilen leicht zugänglich und möglichst bequem zu handhaben war. Schließlich sollte er kräftig und stabil gebaut und aufgestellt sein, damit Erschütterungen möglichst wenig auf ihn einwirken konnten. Die nachfolgenden Zeichnungen bringen die Konstruktion und Aufstellung des neuen Apparates zur Anschauung.

Figur	Maßstab	
5	1 : 5	Übersichtsplan, Längsschnitt.
6	1 : 5	„ Ansicht von oben.
7	1 : 2½	Der Biegungsapparat selbst, Schnitt senkrecht zum „Biegungstisch“.
	1 : 2½	Details zu Fig. 7:
8	1 : 2½	Hebel 1, Ansicht von oben.
9	1 : 2½	„Interferenztisch“, Ansicht von oben.
10a	1 : 2½	Grundplatte mit „Biegungstisch“, Ansicht von oben.
10b	1 : 2½	„ „ „ Seitenansicht.
11	1 : 2½	Hebel 2, Ansicht von oben. (8 und 11 gehören zur Belastungsvorrichtung.)
12	1 : 3	Der „Kopf“ des Apparates mit der Belastungsvorrichtung.
12a	1 : 3	Schnitt parallel der Achse des „Konusses“.
12b	1 : 3	Entsprechende Seitenansicht.
12c	1 : 3	Ansicht von hinten nach Entfernung des Deckels.
12d	1 : 3	Einzelteile des Mechanismus.
12e	1 : 3	Ansicht von oben.
14	1 : 20	Gesamtanordnung.

(Bei den zusammengehörigen Zeichnungen stimmen die Buchstaben überein.)

Das Gehäuse. (ca. 1 : 5 natürliche Größe.)

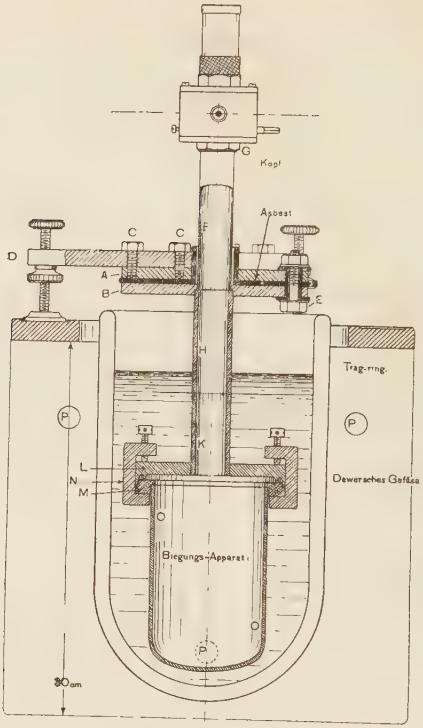


Fig. 5.

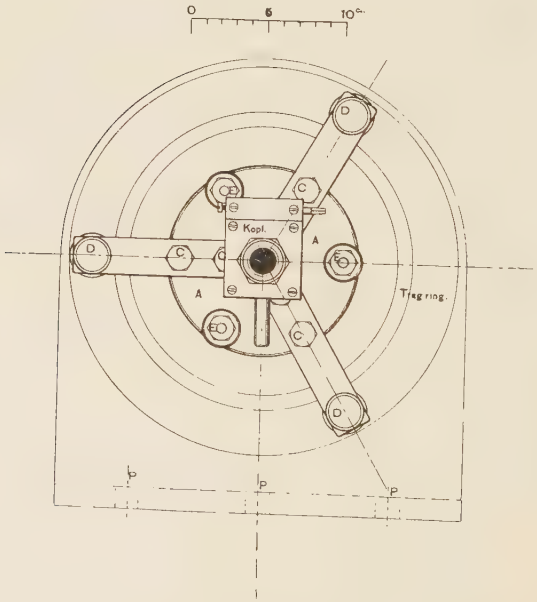


Fig. 6.

An einer runden Eisenplatte A sind drei Arme D angeschraubt, an ihren Enden mit Stellschrauben versehen. Diese Teile dienen nur zur Aufhängung und Horizontierung und bleiben stets auf Zimmertemperatur.

An die Platte A ist unter Zwischenschaltung einer dicken Asbestschicht eine gleiche Scheibe B mit Hilfe der drei Schrauben E fest angepreßt. An B wird der weitere Apparat anmontiert. Diese Art der Ausführung bezweckt bei großer Stabilität des an B befestigten Apparates die thermische Isolierung der Teile, welche auf andere als Zimmertemperatur gebracht werden müssen. In B sind zwei Neusilberrohre von je 20 mm lichter Weite eingeschraubt, durch welche man von oben her in das Innere der Kapsel schauen kann, in der sich der eigentliche Biegungsapparat befindet. Das obere Rohr F von 0,5 mm Wandstärke trägt den später zu beschreibenden „Kopf“, das nach unten führende H—K von 2 mm Wandstärke den eigentlichen Biegungsapparat. Auf das folgende Neusilberrohr K ist die Platte L aus zähem Stahl aufgeschraubt. Ihr Rand besitzt die hier angedeutete, in Fig. 7 nochmals genauer dargestellte Form. Mit Hilfe von 12 Klammern N läßt sich der durch einen Rotgußring M verstärkte Rand der Kappe O gegen die Platte L drücken. In der Kappe O—O befindet sich der gleich zu beschreibende eigentliche Biegungsapparat.

Zunächst jedoch noch ein paar Worte über den Verschluß. Der Stahldeckel hat die in Fig. 7 genauer wiedergegebene Form. Der Rotgußring wird gegen die kreisförmige Schneide w—w (Winkel = 70—80°) gepreßt und so eine absolute Dichtung hergestellt, auch bei der Temperatur der flüssigen Luft. Damit die kreisrunde Schneide immer an die gleiche Stelle kommt, und um sie möglichst zu schützen, besitzt der Deckel noch den ringförmigen Vorsprung bei v—v, welcher aber nicht zur Dichtung beiträgt. Der Verschluß ist viele hundertmal in Benutzung gewesen, ohne zu versagen. Nur einmal mußte die obere Fläche des Rotgußringes, in welchen sich die Schneide eindrückt, neu abgedreht werden.

Der eigentliche Biegungsapparat.

(Fig. 7 bis 11, ca. 1 : $2^1/_2$ natürliche Größe.)

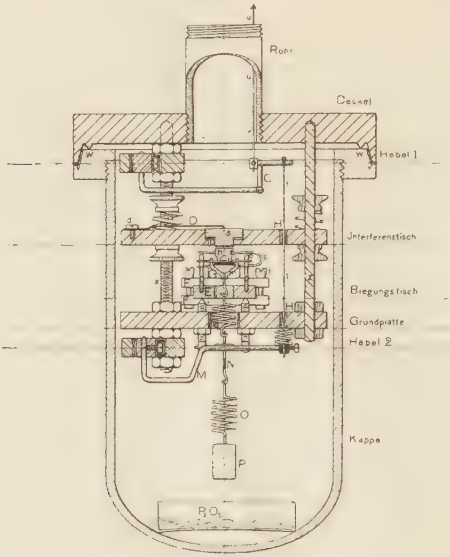


Fig. 7.

In den Deckel sind drei lange stählerne Schraubenspindeln x, y, z eingeschraubt, auf welche verschiedene Apparateteile von unten aufgesteckt und durch Schraubenmuttern justiert und gehalten werden.

Zu oberst befindet sich der Halter A eines in Spitzen a—a gelagerten Hebels 1 (C in Fig. 7 und 8), welcher in dem Stahlstück B durch die Schrauben b—b festgeklemmt wird. Der Hebel besitzt die gezeichnete gebogene Form, damit das Gesichtsfeld nicht beeinträchtigt werde, und dient als Zwischenglied der „Belastungsvorrichtung".

Darauf folgt (Fig. 7 und 9) der sogen. „Interferenztisch". Derselbe trägt das schwach keilförmige[1]) Glaskörperchen s, dessen

[1]) Pulfrich, Z. f. I.-K. 13.

Unterseite den Interferenzraum begrenzt. Es wird von der Blattfeder D leicht auf drei kleine Spitzen gedrückt und hat die gezeichnete Form. Seine Unterfläche ragt zur bequemen Einstellung

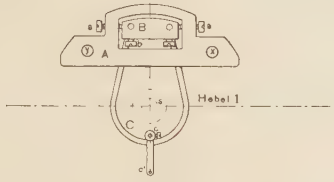


Fig. 8.

ein wenig aus der Unterfläche des Tisches hervor. Dieser, eine kreisrunde Stahlplatte, ist zur Einstellung der Interferenzstreifen durch die gezeichneten Schrauben justierbar.

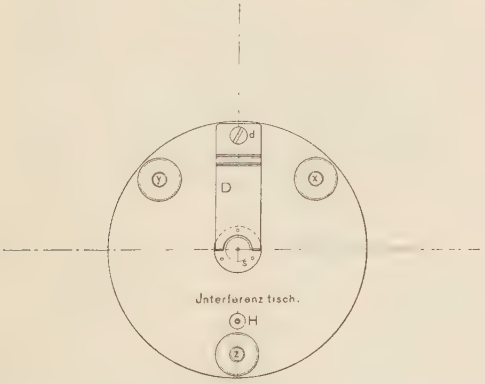


Fig. 9.

Unter diesem Interferenztisch befindet sich (Fig. 7 und 10) der wichtigste Teil der Anordnung: der „Biegungstisch", ganz aus Stahl. Auf einer „Grundplatte", die durch 2 mal 3 Sechskantschraubenmuttern an den langen Spindeln x, y, z fixiert ist, steht der „Biegungstisch", justierbar durch drei Schrauben J, von

denen eine in einen Körnerpunkt, eine zweite in eine kleine Nute an der Unterseite des Biegungstisches zielt (Thomsonsche Anordnung), um dem Tisch eine feste Lage zu geben, aber gleichwohl seiner Längenänderung bei Temperaturänderungen kein Hindernis zu bieten. Der Biegungstisch stammt im wesentlichen aus dem Apparat von Herrn Lissauer, er wurde aber verschiedentlich abgeändert. Seine Konstruktion ist die folgende: Auf der rechteckigen Platte E sind zwei Schlitten F—F an jeder beliebigen Stelle mit Hilfe der Schrauben f festklemmbar.

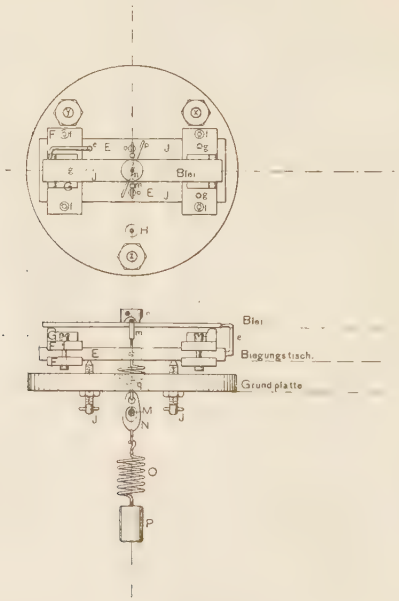


Fig. 10.

Auf diesen Schlitten sitzen die beiden Stahlschneiden G, die linke um eine vertikale Achse dreh- und durch die Schraube g festklemmbar. Die rechte Schneide ist um eine senkrecht zur Schneidenrichtung gehende horizontale Achse mit Hilfe der beiden Schrauben g—g neigbar. Diese Einrichtung war getroffen, um die beiden Schneiden räumlich einander parallel stellen zu können.[1]) Auf den Schneiden, die anfangs scharfkantig, dagegen

[1]) Über Justierung der Schneiden und des Biegungsapparates überhaupt s. Diss. Lissauer, München 1907.

später abgerundet waren, ruht das zu biegende Stäbchen, in der Fig. 10 mit „Blei“ bezeichnet. Quer mitten über dem Stäbchen liegt der Belastungsbügel m, gegen seitliches Verrutschen durch zwei kleine Gäbelchen o—o gesichert. An diesen Bügel kann durch die gleich zu besprechende Vorrichtung das Belastungsgewicht gehängt werden. Über dem Bügel steht ein winziges dreibeiniges Glaskörperchen n, welches mir liebenswürdigerweise die Firma Steinheil geschliffen hat. (Auch das Glaskörperchen s im Interferenztisch stammt von Steinheil.) Zwischen der planen Oberfläche von n und der Unterseite von s entstehen die Interferenzstreifen. Ein kleiner, nur 0,2 mm starker Drahtbügel p klemmt das zu diesem Zweck durchbohrte Glas n ganz leicht an die zu biegende Platte (s. Fig. 7), so daß es sich nicht bei etwaigen Stößen verschieben kann.

Zu unterst (s. Fig. 7 und 11) befindet sich, ähnlich wie der Hebel 1, ein Hebel 2. Auf ihn ist das zweifach durchbohrte

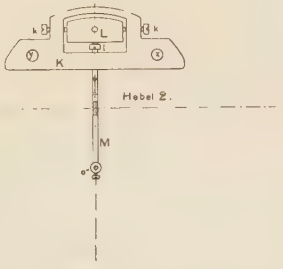


Fig. 11.

Stahlblech N aufgeschoben (Fig. 7 und 10), an welches das mit einer Spiralfeder O versehene Belastungsgewicht P angehängt werden kann. (Über den Zweck der Feder O s. S. 5 unten.)

In die obere Bohrung von N greift der Haken einer zweiten kleinen Spiralfeder q ein, die von dem Belastungsbügel m herabhängt. Wird der Hebel 2 angehoben, so ist das zu biegende Objekt nur durch den Glaskörper n, den Belastungsbügel m und die Feder q belastet. Wenn man aber den Hebel 2 senkt, so wird auch noch das Belastungsgewicht O—P angehängt, und zwar wegen der Zwischenschaltung der Feder q ganz allmählich.

Um nun dem Hebel 2[1]) die gewollte Bewegung zu erteilen, ist er durch einen Draht t (Fig. 7) mit dem Hebel 1 verbunden. Von der kleinen Klemme (Fig. 7 und 8) desselben führt ein 0,1 mm starker Neusilberdraht u—u—u an der Wand des 20 mm weiten Rohres nach oben in den „Kopf" des Apparates, wo sich der Antriebsmechanismus befindet, um den Draht u anzuziehen oder nachzulassen, und somit das Gewicht an die zu belastende Platte anzuhängen oder abzuheben.

Fig. 12 läßt die Konstruktion des **„Kopfes"** erkennen. A ist das von S. 9 her bekannte, 0,5 mm starke und 20 mm weite Neusilberrohr, welches die Vorrichtung trägt. In den massiven Kasten D aus Messingguß ist das Rohr C eingesetzt, in welches die Leitung zur Luftpumpe eingekittet ist. In den Deckel E, dessen Fugen später verlötet wurden, war unter Vermittlung einer Lederdichtung die Mutter G eingeschraubt, deren Durchbohrung, die Einschauöffnung, mit einem ein wenig geneigt[2]) eingekitteten Planparallelglas H verschlossen ist. Um dieses Glas gegen Beschlagen zu schützen, wenn etwa dieser Teil sich unter die Zimmertemperatur abkühlen sollte, ist eine „Trockenkammer" K—L mit Hilfe eines Stückes Gummischlauch daraufgesetzt.

Der auf dieser Seite genannte, zum Belastungsmechanismus führende Neusilberdraht endet oben an dem Hebel b (Fig. 12 a und 12 c), welcher an den stählernen Konus c geschraubt wird. Dieser Hebel b war viertelskreisförmig gebogen, um nicht das Gesichtsfeld zu stören. Er ist der größeren Deutlichkeit halber in Fig. 12 a und 12 d in einer um 90° gedrehten Lage gezeichnet, seine wirkliche Stellung ist in Fig. 12 c punktiert angedeutet.

Der Konus c läuft in einem dicken Stahlblock (Fig. 12 a), welcher als seitlicher Abschluß in den Messingkasten D gelötet ist, und wird mit Hilfe des Schneckengetriebes n—n (Fig. 12 c) und des Zahnrades f in Drehung versetzt. Um aber zu vermeiden, daß im Laufe der Zeit durch oftmalige Betätigung der

[1]) Die kleine Spiralfeder am rechten Ende des Hebels 2 (Fig. 7) soll die Drähte t und u in stets gespanntem Zustand erhalten.

[2]) Pulfrich, Z. f. I.-K. 13.

Stahlklotz seitlich ausgeschliffen werde, befindet sich zwischen dem Antriebsrad f und dem Konus c (Fig. 12 d) eine elastische Kuppelung. Die Flachfeder g hält f in der richtigen Lage. Der lange Stift m—m dient dem Rade f als Achse und drückt gleichzeitig den Konus c in sein Lager. Durch Drehen am Kopfe p kann der Mechanismus in Bewegung gesetzt werden, so daß die

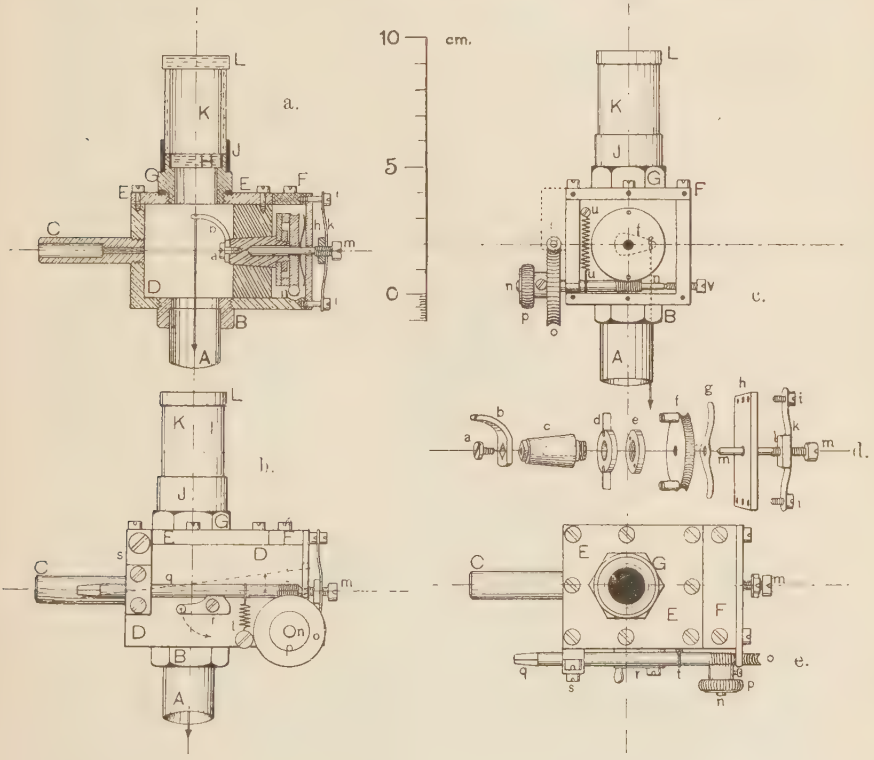


Fig. 12 a—d.

Belastungsvorrichtung unten im eigentlichen Biegungsapparat in Tätigkeit tritt. An der Außenseite des Gehäuses befindet sich nochmals eine Übertragung ins langsame, bestehend aus Zahnrad o und Schneckentrieb q (Fig. 12 b, c und e). Der letztere kann vermittels eines Exzenters r hochgeklappt werden, wenn man die Belastungsvorrichtung in schnellerem Tempo laufen lassen will. Gewöhnlich wird mit der doppelten Übersetzung gearbeitet.

Da es sich voraussehen ließ, daß der Apparat häufig benutzt werden würde, so war ein maschineller Antrieb der Belastungsvorrichtung gewählt, der nebenbei erschütterungsfreies Arbeiten gewährleistete. Vom Ende der Achse q (Fig. 12b, e) führt eine ca. $^3/_4$ m lange „biegsame Welle“ zu einem ganz getrennt von dem übrigen Apparat stehenden, durch einen Elektromotor angetriebenen Vorgelege. Der Motor ist umsteuerbar, seine Geschwindigkeit regulierbar; die nötigen Schalter befinden sich direkt am Beobachtungstisch. Somit kann man bei den Beobachtungen in bequemer Weise den Belastungsvorgang vollziehen und, ohne durch eine andere Tätigkeit abgelenkt zu werden, dauernd die Interferenzstreifen im Auge behalten. Um bei geschlossenem Apparat festzustellen, ob das Stäbchen belastet oder entlastet war, wurde am Konus c (Fig. 12, 13) ein Zeiger

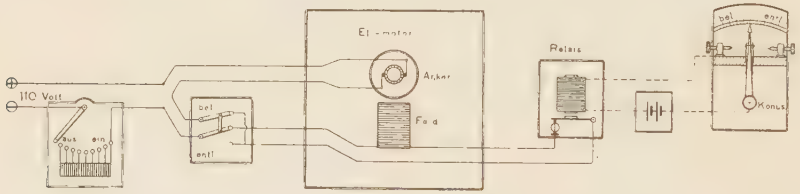


Fig. 13.

angebracht, der auf einer Skala den augenblicklichen Zustand der Belastungsvorrichtung erkennbar machte. Mit diesem Zeiger waren zwei einstellbare Kontakte verbunden, die durch Vermittlung eines Relais den Motorstrom am Ende der Belastung oder Entlastung ausschalteten (s. Fig. 13). Wenn dabei der Belastungsmechanismus weitergelaufen wäre (was vordem einigemal stattgefunden hatte), war zu befürchten, daß zum mindesten die Messung infolge einer Entjustierung unbrauchbar wurde, womöglich auch der Biegungsapparat Schaden litt. Diese mechanische Belastungsvorrichtung erwies sich als vorteilhaft, weil man beim Beginn der Streifenwanderung die ganze Aufmerksamkeit dem Abzählen der Streifen widmen mußte. Sie ist mir bei den zahlreichen Versuchen sehr zustatten gekommen.

Gesamtanordnung.

Fig. 14, 1 : 20 natürlicher Größe.

Auf dem Fundament steht unter Zwischenschaltung von vier kurzen Bleifüßen (feste Basis!) ein Steinpfeiler von rund 350 kg Gewicht, der mit Hilfe des auch in Fig. 5 und 6 angedeuteten

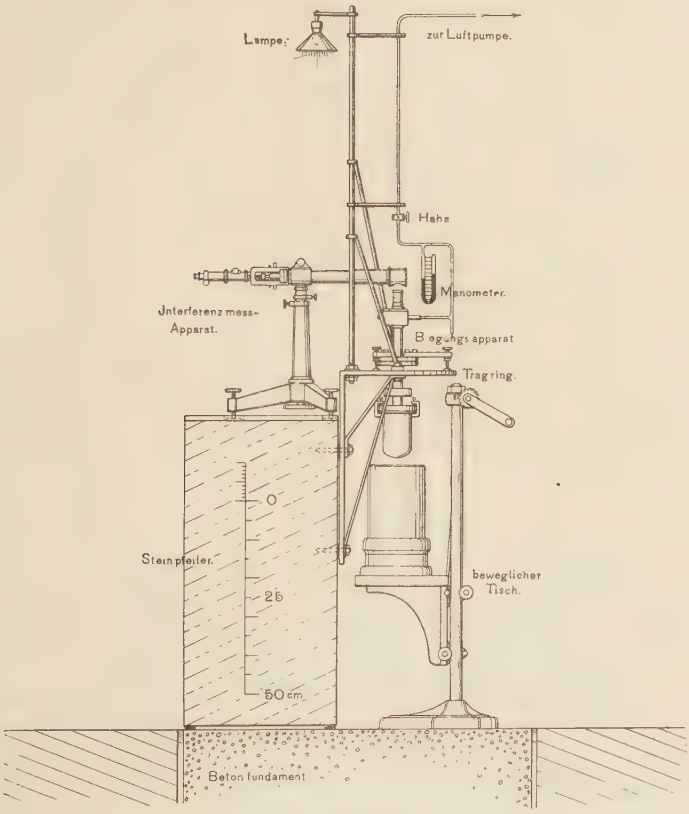


Fig. 14.

sehr kräftigen Tragringes und Eisenwinkels den Biegungsapparat, ferner den Interferenzmeßapparat[1]) trägt. Das Unterteil des Biegungsapparates kann in die verschiedenen Temperaturbäder getaucht werden, welche sich mit Hilfe eines in die Höhe wind-

[1]) Z. f. I.-K. 18. 1898. p. 261.

baren Tisches von unten an den Apparat heranbringen lassen. In dieser, später in Kleinigkeiten vielfach veränderten Ausführung wurde der Apparat sehr oft benutzt. Die Anordnung stand zunächst im Erdgeschoß auf einem vom Gebäude nicht isolierten Steinpfeiler.

Nachdem der Biegungsapparat im rohen fertig war, wurden alle nach außen führenden Fugen sorgfältig verlötet, er dann endgültig auf seinen Träger gesetzt und zu ihm der Interferenzmeßapparat justiert; dann konnten die Messungen beginnen.

Der neue Apparat erfüllte im allgemeinen die auf ihn gesetzten Hoffnungen, jedoch kamen zunächst keine genauen Resultate zustande. Denn wie später gezeigt wird, mußten noch eine Menge Schwierigkeiten überwunden und sich gegenseitig überlagernde Fehler Schritt für Schritt unschädlich gemacht werden, ehe sich sichere Angaben erhalten ließen. Wir besprechen zunächst die ersten, noch ungenauen Messungen. Das folgende Kapitel ist dem Aufsuchen und der Beseitigung der Fehlerquellen gewidmet. Am Schluß des Teiles folgen die endgültigen Werte.

Drittes Kapitel.

Biegungsversuche an Bleistäbchen.

A. Nicht endgültige Versuche, Fehlerquellen und deren Beseitigung, Beobachtungsmethode.

Von einem 2,5 mm dicken Bleiblech wurde ein ca. 15 mm breites, 70 mm langes Stück abgeschnitten, gerade gehämmert und darauf planparallel abgedreht. Hierzu wurde das Objekt auf einem Holzfutter mit Wachs-Kolophoniumkitt befestigt, zunächst die eine, dann nach Umkitten die rückwärtige Fläche sauber auf einer mit Kreuzsupport versehenen Drehbank abgedreht. Aus der noch zu großen Platte ließ sich mit einem scharfen Messer leicht das zu biegende Stäbchen herausschneiden, welches in allen Fällen rund 1 mm dick, 5 mm breit und 60 mm lang war. Erst dann wurde diese Platte vom Holzfutter abgekittet, mit Äther gereinigt und vorsichtig die Kanten vom

Grat befreit. Die so vorbereitete Platte kam auf den Biegungstisch, welcher im Biegungsapparat so weit justiert wurde, bis sich gute Interferenzstreifen zeigten. (Der Biegungspfeil ist stets gemessen in Halbwellen des grünen Hg-Lichtes, $\lambda = 546\ \mu\mu$, welches von der am Interferenzmeßapparat befindlichen Geißlerröhre ausgesandt wurde.) Der Apparat wurde durch Aufschrauben der Kappe geschlossen und mit der Wasserstrahlpumpe evakuiert. Damit war die Messung vorbereitet.

Gleich bei den ersten Versuchen zeigte es sich, daß selbst bei der kleinen von mir angewandten Belastung (fast ausnahmslos 3,5 g) eine bedeutende elastische Nachwirkung vorhanden war.

Prinzip der Beobachtungen.

Die ersten vorläufigen Messungen.

Nachdem zunächst der Apparat einigemal belastet und entlastet worden war, um sein sicheres Funktionieren zu prüfen, wurde nach einer Ruhepause zu einer Messung des Biegungspfeiles der Bleiplatte bei Zimmertemperatur geschritten. Dabei stak der unterste Teil des Biegungsapparates in dem leeren Dewarschen Gefäß (lichte Weite 15 cm, innere Höhe 30 cm, von Burger, Berlin) und war mit Tüchern zugedeckt, um Temperatureinflüsse fernzuhalten. Die ersten Beobachtungen wurden derart angestellt, daß man, nachdem das Stäbchen eine längere Zeit entlastet gestanden hatte, zuerst den im Fernrohr des Interferenzmeßapparates befindlichen Doppelfaden auf einen beliebigen Interferenzstreifen möglichst in der Mitte des Gesichtsfeldes einstellte; dann wurde die vorhin beschriebene mechanische Belastungsvorrichtung eingeschaltet. Der Vorgang der Belastung, also das Anhängen des Belastungsgewichtes, dauerte wegen der großen Übersetzung (s. S. 15) und wegen der Feder q (s. S. 13) ungefähr 10 Sekunden. Während dieser Zeit zogen die Streifen schnell an der Marke vorüber.[1]) Die Zeit wurde vom Augenblick

[1]) Die Belastungszeit abzukürzen war untunlich wegen der dann auftretenden Rucke, welche das Auszählen der Streifen verhinderten. Wegen der langen Zeitdauer dieses Vorganges wurde die Trennung der elastischen Biegung von der elastischen Nachwirkung unmöglich gemacht. Daher wird

der Wanderung der Interferenzstreifen an mit einer Stoppuhr gemessen.

War die Belastung vollendet, so wurde neben der zugehörigen Zeit die Anzahl der vorübergegangenen Streifen notiert und dann das Augenmerk ihrem langsamen Weiterwandern zugewendet, welches durch die elastische Nachwirkung bedingt war. Die Zehntelstreifen sind nur geschätzt. Nachdem die Belastung eine längere Zeit gewirkt hatte, wurde wieder entlastet und dabei in der gleichen Weise verfahren wie beim Belasten. Auf diesem Wege sind die in Fig. 15 wiedergegebenen Kurven entstanden.

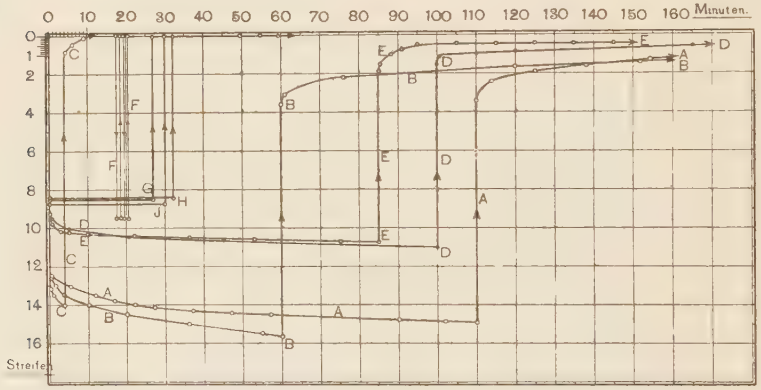


Fig. 15.

Versuch Nr. 1: Kurve A. Bei der Belastung wanderten 12,5 Streifen an der vorher eingestellten Marke vorüber. Der 13. wurde nach 5,5, der 13.5. nach 12 Minuten, der 14. nach 22 Minuten erreicht und so fort. Nach 110 Minuten, in denen im ganzen 14,9 Streifen vorübergezogen waren, wurde wieder entlastet. Bei der Entlastung gingen 11,5 Streifen, dann weitere an der Marke vorbei, die in der gleichen Weise wie vorhin zur Beobachtung gelangten.

---

von vornherein auf Angabe des Youngschen Moduls verzichtet. Als Größe der elastischen Nachwirkung sehen wir den Zuwachs des Biegungspfeiles an, der nach Ablauf der ersten 10 Minuten in der darauffolgenden halben Stunde durchlaufen wurde.

Versuch Nr. 2: Kurve G. Am folgenden Tage wurde der gleiche Versuch wiederholt, jedoch bei der Temperatur der flüssigen Luft. Zwei Stunden nach Beginn der Abkühlung war, wie der nunmehrige Stillstand der Streifen erkennen ließ, die Temperatur des Biegungsapparates konstant geworden. (Die Streifen hatten sich während der Abkühlung so verengert, daß ihre Abzählung beim Belasten oder Entlasten sehr schwierig war.) Nachdem also Temperaturkonstanz eingetreten war, wurde zum Versuch geschritten. Beim Belasten mit dem gleichen Gewicht und unter gleichen Bedingungen wie beim Versuch Nr. 1 (der Apparat wurde während einer Meßreihe niemals berührt!) gingen 8,5 Streifen am Doppelfaden vorüber. Es zeigte sich kein merkliches Weiterwandern der Streifen, obwohl die Belastung über 25 Minuten ausgedehnt wurde. Nach dem Entlasten nahmen die Streifen, so genau man überhaupt ablesen konnte, wieder ihre frühere Lage ein und behielten diese auch in den nächsten 25 Minuten bei.

Ebenso wurde die nächste Messung bei der Temperatur eines Kohlensäure-Alkoholbades ausgeführt: Versuch Nr. 3: Kurve D. In ganz gleicher Weise folgten noch zwei Versuchsreihen mit dem gleichen Stäbchen, welche die übrigen Kurven lieferten.

Diskussion der Kurven der Fig. 15.

$A_1 \ldots B_6 \ldots C_9 \ldots$ bei $t = +\ 17^0$ C
$D_3 \ldots E_5 \ldots F_8 \ldots$ „ $t = -\ 80^0$ „
$G_2 \ldots H_4 \ldots J_7 \ldots$ „ $t = -185^0$ „

(Bem.: Die Indizes geben die Reihenfolge der einzelnen Versuche an. Die Anfangspunkte für sämtliche Kurven [F ausgenommen] sind in den Nullpunkt der Zeit und der Streifenwanderung gelegt.)

Die Versuche ergeben eine Abnahme der elastischen Nachwirkung bei sinkender Temperatur. Man erkennt aber das Vorhandensein von Fehlerquellen. Bei den drei Kurven G, H, J, welche bei der Temperatur der flüssigen Luft aufgenommen sind, findet man keine völlige Übereinstimmung der Biegungspfeile. Die gleiche Unstimmigkeit zeigen auch die Kurven D, E bei $t = -80^0$. Bei Versuch F war nur 2 mal kurze Zeit belastet und entlastet worden. Da bei diesen Versuchen Temperaturänderungen nicht

in Betracht kamen, so wurden als vermutliche Fehlerquelle die zum Apparat gelangenden Erschütterungen angesehen, welche ein Wandern der Streifen hervorbrachten, von dem bereits S. 6 gesprochen war.

Am bedeutendsten ist aber die Unsicherheit bei den bei Zimmertemperatur angestellten Versuchen A, B, C. Kurve A zeigt beim Belasten schwache, beim Entlasten stärkere elastische Nachwirkung, während umgekehrt Kurve B beim Belasten stärkere Nachwirkung aufweist wie beim Entlasten. Dies deutet auf Temperaturgang während der Versuche hin, welcher wieder eine die Kurven überlagernde Streifenwanderung im einen oder anderen Sinn zur Folge hat. Um Temperaturänderungen auszuschließen, wurde in Zukunft das Dewarsche Gefäß mit Wasser angefüllt, um dem Biegungsapparat eine größere Wärmekapazität zu verleihen. Die hervorstehenden Teile waren mit Watte verpackt. Aber, wie sich später zeigen wird, war dieser Schutz bei weitem noch nicht hinreichend.

Sichere Schlüsse lassen sich also aus den bisherigen Versuchen noch nicht ziehen, weil eben noch verschiedene sich gegenseitig überlagernde Fehlerquellen die Resultate mit Unsicherheit behaften. Die Beobachtungen geben also nur eine annähernde Orientierung.

Ich wende mich nun zunächst zu der Beseitigung eines anderen bei diesen Messungen hervorgetretenen Übelstandes. Es war vorhin schon gesagt worden (S. 21), daß beim Abkühlen des Apparates die vorher breiten Interferenzstreifen sich derart zusammenzogen, daß ihre Abzählung und Zehntelschätzung schwer, ja beinahe unmöglich war. Die Erschütterung beim anfangs heftigen Sieden der flüssigen Luft konnten denkbarerweise eine Entjustierung hervorgerufen haben. Merkwürdigerweise erlangten aber die Streifen die frühere Breite, sobald der Apparat die Zimmertemperatur wieder erreicht hatte. Das legte denn die Vermutung nahe, daß sich irgendwelche Apparatenteile beim Abkühlen ungleich verkürzten oder verbögen, und daß damit das Engerwerden der Streifen zusammenhinge. Die Versuche H, J der Fig. 15 wurden noch durchgeführt wie der erste G, nur ver-

suchte man bei H, J die Streifen durch vorsichtiges Klopfen an den Apparat zu verbreitern, was jedoch nicht immer gelang und manchmal zu einer gänzlich neuen Justierung zwang.

Um von diesem unsicheren und gewalttätigen Verfahren frei zu werden, wurden einige Teile am Biegungsapparat, die besonders verdächtig waren, abgeändert (s. Fig. 16). Die drei Stangen A, A, welche die verschiedenen „Tische" tragen, sind nunmehr glatte Invarstäbe, die hintereinander von einer Stange geschnitten waren, ohne Gewinde; der „Interferenztisch" B besteht

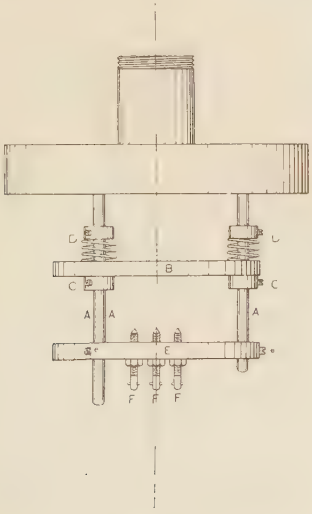


Fig. 16.

aus Atlasstahl, dem man große Homogenität nachrühmt. Er wird durch drei Federn D auf drei Stellringe C aus Atlasstahl aufgedrückt. Die „Grundplatte" E, gleichfalls aus Atlasstahl, ist durch drei kleine Schräubchen e fixiert. Die den „Biegungstisch" tragenden Justierschrauben F sind wieder aus einem Stück Nickelstahl geschnitten.

Bei dieser Gelegenheit brachte ich verschiedene kleine Verbesserungen am Apparat an: am „Biegungstisch" die winzigen Gäbelchen o (Fig. 7 und 10), welche den Belastungsbügel m in der Mitte des Bleiplättchens halten. Da sich bei längerem Stehen

das Stäbchen infolge der Erschütterungen auf den Schneiden verschob, wurden kleine, bewegliche Arme am „Biegungstisch“ befestigt, welche das Stäbchen mit ganz geringem Spielraum umklammerten. Vier verhüteten seitliches Verrutschen auf den Schneiden, zwei andere Verschiebung in der Längsachse des Stäbchens. Je ein Arm ist in der Fig. 10 mit e und e′ bezeichnet. Um das Eindringen der Schneiden (anfangs scharf) in das Blei zu vermeiden, benutzte man dünne Glasplättchen als Zwischenlage, bei späteren Messungen kamen die in Fig. 10 gezeichneten abgerundeten Schneiden zur Anwendung.

Der nächste Versuch, den Biegungspfeil der Bleiplatte bei der Temperatur der flüssigen Luft zu messen, zeigte erstaunlicherweise, daß die Streifenverengerung in dem gleichen Maße auftrat wie früher. Nach den vorhin besprochenen Umänderungen bestanden jetzt nur noch zwei Möglichkeiten für das Engerwerden der Streifen: Dies lag an einer Verbiegung entweder des Biegungstisches oder des Bleistäbchens bei Temperaturänderungen. Um diese Frage zu entscheiden, wurde statt des Bleistäbchens ein Versuch mit einem Stahlstäbchen gemacht. Da hierbei die Interferenzstreifen fast ebenso breit wie bei Zimmertemperatur blieben, lag also das Engerwerden der Streifen an einem Sichverziehen des Bleistäbchens. Diese Annahme fand auch eine Stütze in der schon früher gemachten Beobachtung, daß das Stäbchen, obwohl es bei Zimmertemperatur sicher auf beiden Schneiden auflag, bei $t = -185^0$ eine wenn auch kleine, aber merkliche Kipptendenz aufwies, welche sich beim Belasten oder Entlasten an einer plötzlichen Streifendrehung zu erkennen gab. Ich bin zu der Überzeugung gekommen, daß die Erklärung für diese Merkwürdigkeit darin zu finden ist, daß durch das Abdrehen dem Blei irgendwie innere, bei Temperaturänderung hervortretende Spannungen beigebracht sind. Eine solche Annahme würde sich auch decken mit den Beobachtungen Grüneisens[1]) in seiner Arbeit über „Die elastischen Konstanten der Metalle bei kleinen Deformationen“, der dort sagt: „Die auffallende Erscheinung, daß die elastische Nachwirkung an einem Plattenpaar bereits

[1]) Ann. 21. 1907. p. 801, bezw. Z. f. I.-K. 27. 1907. § 20.

störend auftritt (beim Belasten), während sie am anderen noch kaum bemerkbar ist, weiß ich nicht sicher zu erklären". Ich vermute, daß es sich in beiden Fällen um eine ähnliche Erscheinung handelt.

Diese zu beseitigen war der nächste Zweck der Untersuchung. Da ich, wie gesagt, den Grund in einer durch das Abdrehen hervorgerufenen Imhomogenität vermutete, galt es, auf andere Weise Stäbchen mit homogenem Gefüge herzustellen. Nach mancherlei fruchtlosen Bemühungen mußte zur alten Methode zurückgekehrt werden, aus einem größeren Stück das Objekt herauszudrehen. Ein ziemlich dicker, gegossener Block aus Kahlbaumschem, ziemlich reinem Blei wurde in drei Teile zersägt und das Mittelstück (wegen der vermuteten größeren Homogenität), wie oben beschrieben, abgedreht. Um aber nach Möglichkeit die besagten, durch das Abdrehen hervorgerufenen inneren Spannungen auszugleichen, wurde das fertige Stäbchen einem **Temperprozeß** unterworfen, worunter in dieser ganzen Arbeit eine Erhitzung (im elektrischen Ofen) bis nahe an den Schmelzpunkt (327 °) heran verstanden werden möge.

Der nun folgende Biegungsversuch mit einem so behandelten Stäbchen hatte endlich das gewünschte Ergebnis und bewies damit die Richtigkeit obiger Überlegung: Die Streifenbreite blieb bei der Kühlung in flüssiger Luft oder Kohlensäure ziemlich die gleiche wie bei Zimmertemperatur. Aber wichtiger als dieser Erfolg war eine ganz unvermutete Tatsache, die bei diesen Versuchen sogleich in die Augen fiel. Die elastischen Eigenschaften des getemperten Bleies zeigten sich nämlich geändert in der Art, daß das Bleistäbchen nunmehr bei Messungen bei Zimmertemperatur lange nicht mehr die bedeutende elastische Nachwirkung zeigte wie das erste in Fig. 15 (S. 20) charakterisierte Stäbchen. Ich führe diese Tatsache hier vorläufig ohne Erklärung an. Sie ist im Verlauf der Untersuchung der Anstoß zu weiteren eingehenden Forschungen geworden.

Nachdem also die Möglichkeit zur Unschädlichmachung der Streifenverengerung vorhanden war, galt es weitere Fehlerquellen aufzusuchen und zu beseitigen, die nämlich, welche die

ziemlich bedeutende Diskrepanz bei den Messungen Nr. 1—9 der Fig. 15 hervorgerufen hatten. Hierzu wurde bei Zimmertemperatur, um die Messungen nicht unnötig zu komplizieren, eine große Reihe von Versuchen mit einem neuen Stäbchen unternommen, ein Teil von ihnen s. Fig. 18, S. 28. Da es aber von größerem Interesse zu sein schien, **ungetemperte** Stäbchen zu untersuchen als solche, deren Vorgeschichte durch das Tempern noch komplizierter war, wurden die Beobachtungen mit einem nicht getemperten Stäbchen angestellt, auch schon zu dem Zweck, die elastische Nachwirkung zu studieren, die ja nach dem Tempern viel geringer wurde wie vordem. Wenn es sich aber später darum handelte, an einem solchen nur gedrehten Stäbchen bei tiefen Temperaturen Biegungsversuche vorzunehmen, so wurde zunächst durch einen Vorversuch festgestellt, in welchem Sinn und in wie hohem Grade die Streifen durch die Abkühlung sich verengerten. Vor den dann folgenden, endgültigen Versuchen wurde das Stäbchen absichtlich bei Zimmertemperatur falsch, und zwar so justiert, daß bei tiefen Temperaturen die Streifen wieder eine zur Messung geeignete Breite hatten. Durch diesen Kunstgriff konnte die Streifenverengerung meist so weit ausgeschaltet werden, daß diese Messungen mit ziemlich der gleichen Sicherheit und Genauigkeit gemacht werden konnten wie bei Zimmertemperatur.

Bei den folgenden Versuchen gelangte übrigens eine etwas andere, genauere **Beobachtungsmethode** zur Anwendung, die zunächst kurz erläutert werden möge: Während früher (s. S. 19 ff.) die Zehntelteile der Interferenzstreifen bei festgehaltenem Doppelfaden nur geschätzt wurden, geschah in der Folge ihre Messung durch den mitbewegten Doppelfaden, welcher bei der langsamen, der elastischen Nachwirkung entsprechenden Streifenwanderung dauernd irgend einem beliebigen Streifen nachgeführt wurde. Die Methode soll an dem folgenden Beispiel klargemacht werden (Fig. 17):

Im Moment der beginnenden Belastung wurde die Beobachtungsuhr (Stoppuhr) in Gang gesetzt. Im gewählten Beispiele waren nach 15 Sekunden 6,4 Streifen vorübergewandert, die Belastung und somit die schnelle Streifenwanderung beendet. So

rasch wie möglich wurde der Doppelfaden auf den nächstliegenden Streifen, hier den 6., eingestellt und Trommelablesung am Interferenzmeßapparat und zugehörige Zeit notiert. In der Folge wird der Doppelfaden auf dem einmal eingestellten Streifen festgehalten und dann nach bestimmtem Schema gleichzeitig Trommelablesung und Zeit aufgeschrieben, von Zeit zu Zeit auch Streifenbreite, Temperatur und Druck im Apparat kontrolliert.

Versuch Nr. 27.

Belastet: $10^{h}\ 54^{min}$	Nach der Zeit	Lage des festgehaltenen Streifens in Trommelteilen	Vorübergewanderte Streifen	Bemerkungen betr. b, t, p[1])
18. Nov. 1909	0 sec	186	0,0	$t = 16{,}4^{0}$
	15 „	?	ca. 6,4	
	25 „	150	auf 6,0. Streifen	
	45 „	?	ca. 6,5	
	1 min	139	(Der 6. Streifen	$b = 90$
	2 „	132	wurde weiterhin	
	3 „	128	mit dem Doppel-	
	5 „	125	faden verfolgt)	$t = 16{,}4^{0}$
	7,5 „	118,5		
	10 „	117		$t = 16{,}4^{0}$
	15 „	110		$b = 90$
	20 „	108		$p = 10{,}2$ mm
	30 „	103		

Die Ablesungen an der Trommelteilung und der Uhr wurden auf Koordinatenpapier aufgetragen und lieferten so die „Hilfskurve", welche dann in leicht ersichtlicher Weise in die „Hauptkurve" transformiert wurde (s. Fig. 17). Beim Entlasten wurde in genau der gleichen Weise verfahren. Diese Beobachtungsmethode kam bei allen späteren Biegungsversuchen in Anwendung.

Die Fig. 18 bringt eine Anzahl derselben zur Anschauung. Man erkennt, daß die einzelnen Kurven noch ganz bedeutend divergieren, obwohl sie unter möglichst gleichen Bedingungen aufgenommen waren. Es ergab sich eine starke Beeinflussung durch die Erschütterung vom Neubau der Universitätsaula, welche

[1]) b = Streifenbreite in Trommelteilen, t = Temperatur des Apparates, p = Druck im Apparat in mm.

unmittelbar an das Institut stößt. Das schlechte Resultat veranlaßte dann den Umzug der Apparate in ein Kellerzimmer, wo größere Ruhe zu erwarten war.

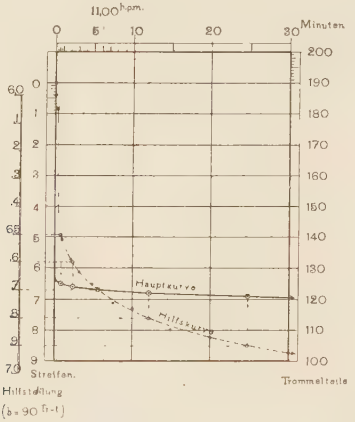


Fig. 17.

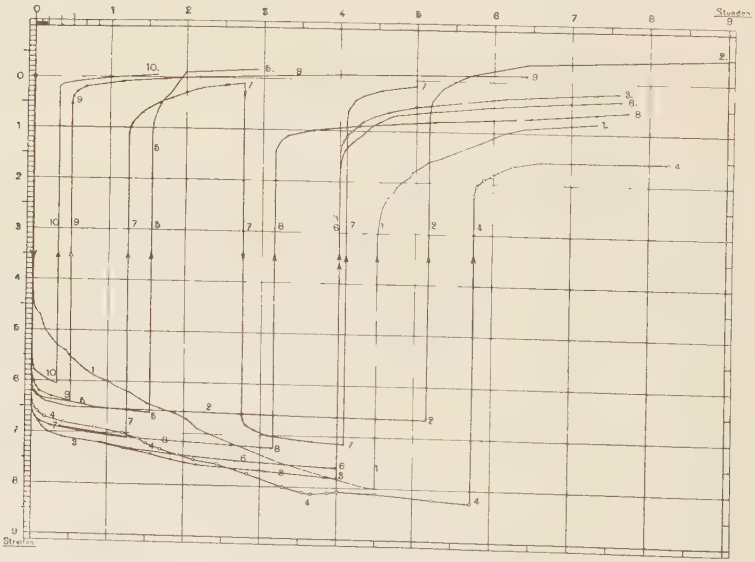


Fig. 18.

In diesem Raum waren bis in den jungfräulichen Grund reichende Betonfundamente eingebaut, der Fußboden und das

Gebäude durch Luftspalte vollständig vom Fundament isoliert. Auf einem derartigen Pfeiler wurden die Apparate in gleicher Weise wie vorher (s. Fig. 14 S. 17) von neuem aufgebaut, ferner die Beobachtungen in die Nachtstunden verlegt, um den doch stets vorhandenen, unvermeidlichen Störungen von außen zu entgehen.

Der Umzug hat alle auf ihn gesetzten Erwartungen vollauf gerechtfertigt. Denn bei der neuen, gegen Erschütterungen besser gesicherten Ausstellung wurde sofort als weitere, und zwar sehr bedeutende Fehlerquelle die bereits S. 22 erwähnte Temperaturschwankung des Biegungsapparates erkannt. Es wurde festgestellt, daß ganz minimale Temperaturänderungen (einige $^1/_{100}{}^0$ C) recht merkliche Streifenverschiebungen zur Folge hatten, so daß, wenn Temperaturkonstanz auch nicht zu erreichen war, ein Temperaturgang von äußerstenfalls ein paar $^1/_{1000}{}^0$ pro Stunde gestattet werden durfte. Nach verschiedenen unzureichenden Versuchen wurde dieses Ziel annähernd dadurch erreicht, daß man den unteren Teil des Biegungsapparates in ein Gefäß eintauchen ließ, durch welches anfangs Wasserleitungswasser (s. auch die Bem. S. 35), später Wasser aus einem ca. $^3/_4$ cbm fassenden Reservoir vermittels eines schnell rotierenden Schraubenrührers in stetem Kreislauf hindurch- und wieder zum Reservoir zurückgeleitet wurde. Um Temperaturänderungen durch (möglicherweise variable) Verdunstungskälte fernzuhalten, bedeckte eine Ölschicht die Wasseroberfläche. Da aber die Wassermasse trotz ihrer großen Wärmekapazität merklich den Schwankungen der Zimmertemperatur folgte, wurde eine automatische **Reguliervorrichtung für den Gasofen** des Beobachtungsraumes angebracht, welche hier wegen ihrer Einfachheit und guten Funktion kurz beschrieben werden soll.

Eine bimetallische Lamelle aus Eisen—Zink von beiläufig 1 m Länge (s. die Konstruktionszeichnung Fig. 19 auf S. 30) schloß oder öffnete je nach Stellung bezw. Zimmertemperatur einen Stromkreis, in den ein elektrisch betätigtes Ventil eingeschaltet war. Durch dieses wurde die Gaszufuhr zum Ofen verkleinert oder vergrößert, so daß die Zimmertemperatur nur

mehr um Bruchteile eines Grades schwankte. Infolgedessen durfte man wohl berechtigterweise vollkommene Temperaturkonstanz des Wasserbades und damit des Biegungsapparates annehmen. Das Ventil (Fig. 20) war auf einer mit kreisrunder Nut versehenen Holzplatte befestigt und mit einer in diese Nut passenden und aufgekitteten Glasschale abgeschlossen. Der

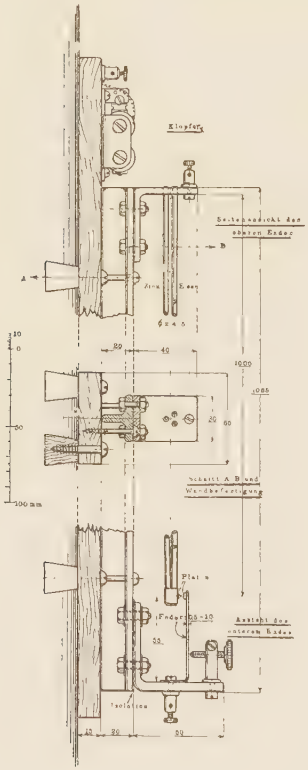


Fig. 19.

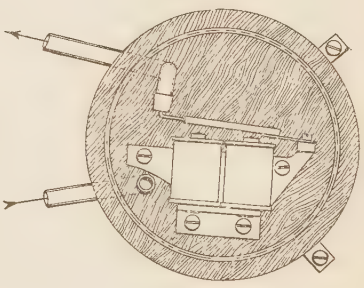


Fig. 20.

Mechanismus, ein altes Glockenwerk mit Gummistopfen statt des Klöppels, ist aus der Zeichnung ersichtlich. Die bimetallische Lamelle des temperaturempfindlichen Organes war auf einem Profileisen montiert. Zur Vermeidung von Funken an ihrer Kontaktstelle waren Ventil und Organ parallel geschaltet (Fig. 21) und unter Vorschaltung einer passenden Glühlampe an die Stadt-

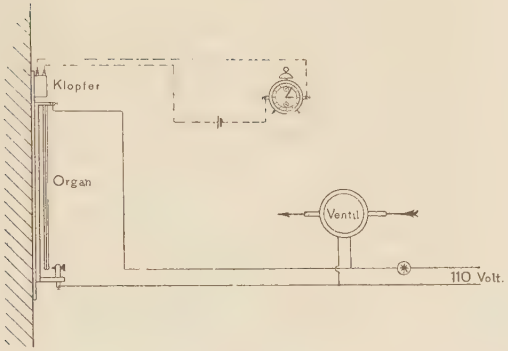


Fig. 21.

leitung angeschlossen. Ein „Minutenklopfer“, oben am Thermoorgan angebracht, ebenfalls ein Glockenwerk, vermied durch Erschütterung des Organes das Verschmutzen seines Kontaktes und erhöhte seine Empfindlichkeit. Der minutliche Stromschluß geschah durch eine Weckuhr mit eingebautem Minutenkontakt. Schließlich ist noch ein schräg nach oben blasender Ventilator zu erwähnen, der die Luft im Zimmer durcheinander mischte und dafür sorgte, daß an jeder Stelle des Raumes die gleiche

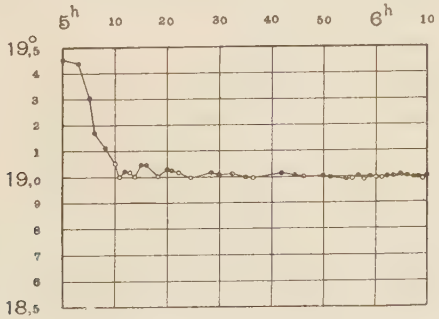


Fig. 22.

Temperatur herrschte. Das beigegebene Diagramm (Fig. 22) veranschaulicht die ausgezeichnete Wirksamkeit der beschriebenen Apparatur. Nach einer längeren Pause wurde zur Zeit 5^h die Vorrichtung in Betrieb gesetzt. Bereits nach 10 Minuten war die früher eingestellte und wochenlang konstant gehaltene Temperatur von 19,0° erreicht. Die Schwankungen betrugen nach 30 Minuten

nur mehr wenige hundertstel Grad. (Das in $^1/_{10}{}^0$ geteilte Thermometer wurde aus 2 m Entfernung abgelesen.)

Nachdem in dieser Weise ein sehr störender Fehler ausgeschaltet war, mußten noch einige kleinere Änderungen am Apparat vorgenommen werden, deren Notwendigkeit sich inzwischen herausgestellt hatte. Vor allem waren tadellose Verbindungen der verschiedenen Zwischenteile der Belastungsvorrichtung erforderlich, um ruckfreies Belasten und Entlasten zu gewährleisten. Demnach wurde auf Hebel 2 (Fig. 7 und 11) an der in Betracht kommenden Stelle eine winzige Schneide aufgelötet, ferner mit Uhrmacherwerkzeugen die Berührungspunkte an der Feder q und dem Stahlplättchen N zugeschärft und poliert. Beim Zusammenbau dieser Apparatenteile war peinlich darauf zu achten, daß der untere Haken der Feder, sein Berührungspunkt im oberen Loch von N, sowie der des Hebels 2 im unteren von N genau senkrecht übereinander lagen, was bei der Kleinheit dieser Teile nicht ganz leicht zu erreichen war. Andernfalls trat beim Belasten oder Entlasten Reibung an diesen Stellen auf, wodurch manchmal die Justierung gestört wurde, jedenfalls aber die Interferenzstreifen beim Vorüberwandern während des Belastens ruckten und aus diesem Grunde nicht sicher ausgezählt werden konnten.[1]) Derartige Schwierigkeiten gab es noch mehr, so beim Justieren der zu biegenden Platte auf den Schneiden oder beim Zusammensetzen, ferner beim Schließen des Apparates. Selbst das Aufstülpen und Anschrauben der Kappe O (Fig. 5) und Anziehen der Klemmschrauben mußte gelernt werden, ehe es ohne Stoß und Ruck gelang. Und das war sehr notwendig, denn Erschütterungen verdarben sofort die mühsame Justierung. Das Herstellen schöner Interferenzstreifen war nicht leicht, da ja an den Trägern des Interferenztisches nach der Umarbeitung (s. S. 23 Fig. 16) kein Gewinde mehr vorhanden war. Dieser Tisch mußte freihändig justiert werden.

[1]) Diese kleinen Rucke beim Belasten, die leider später hin und wieder auftraten, konnten leicht eine zu große Streifenwanderung beim Belasten verursachen und täuschten nach dem Entlasten dauernde Deformation vor. In manchen Fällen sind diese Störungen direkt beobachtet und bei der Beurteilung der Kurven in Rücksicht zu ziehen (s. S. 37, 38, 39, 45).

Schließlich noch ein paar allgemeine Bemerkungen über Apparat und Beobachtungsmethode: Da die Versuche auch bei tiefen Temperaturen angestellt werden sollten, durfte der Biegungsapparat nur geringe Größenabmessungen aufweisen, um in ein Dewarsches Gefäß zu passen. Dadurch ist die Kleinheit der wesentlichen Teile (Fig. 10) bedingt, und die Handhabung dieser kleinen Teile macht die Arbeit schwierig und mühsam.

Andrerseits muß in Erwägung gezogen werden, daß wegen seiner großen Plastizität das Bleistäbchen, an dem doch die Beobachtungen angestellt werden sollten, nur durch ganz minimale Gewichte belastet werden durfte, wenn nicht dauernde Deformationen auftreten sollten. Aus diesem Grunde mußten die Messungen des Biegungspfeiles, der nur wenige Tausendstel Millimeter beträgt, nach der Fizeauschen[1]) Methode mit Hilfe von Interferenzstreifen erfolgen. Diese Methode war wieder eine Quelle für die bedeutende Empfindlichkeit gegen Stöße und Erschütterungen. Kurzum, die Arbeiten mit dem empfindlichen Apparat erforderten eine ruhige Hand und große Übung, so daß beim Vorbereiten eines Versuches die Geduld des Beobachters manchmal auf eine härtere Probe gestellt wurde als bei den nächtlichen Messungen selbst.

B. Endgültige Messungen der elastischen Nachwirkung eines nicht getemperten Stäbchens bei $t = 8°$, $-80°$, $-185°$.

Fig. 23. Versuch Nr. 24—91.

Aus einer größeren Anzahl von Versuchen ist auf zeichnerischem Wege das Mittel genommen. Es schien untunlich, die Einzelkurven wiederzugeben, wenn die Übersichtlichkeit nicht Schaden leiden sollte. Gleichfalls und aus demselben Grunde wurde auf die Darstellung der Entlastungskurven verzichtet, die übrigens doch von den Nachwirkungserscheinungen beim Belasten überlagert sind. Denn wegen der Verschiedenheit der Belastungszeiten waren die Entlastungskurven wegen ihres verschiedenen Verlaufs nicht so ohne weiteres miteinander ver-

[1]) Pogg. Ann. 119. 1863. p. 87; 128. 1866 p. 564.

gleichbar. Die Vorbedingungen waren also bei den Belastungskurven günstiger, da vor dem Belasten das Stäbchen längere Zeit hindurch, meist viele Stunden lang, unbeansprucht gestanden hatte. Daher werden Schlüsse an dieser Stelle nur aus den Belastungskurven gezogen. Um bei diesen einen gewissen Anhalt zur Beurteilung der Genauigkeit zu bieten, sind in der unteren Kurve (Fig. 23) für die zwei ersten Minuten die am meisten abweichenden Werte vermerkt, im weiteren Verlauf dieser Kurve aber und in den beiden oberen Kurven alle die Punkte wiedergegeben, bei welchen bei einer Einzelmessung jedesmal ein volles Zehntel der Streifenbreite erreicht wurde. Die Abweichungen vom Mittel sind demnach lange nicht mehr so bedeutend wie in Fig. 15 oder 18. Immerhin beträgt die Breite des Fehlerbandes

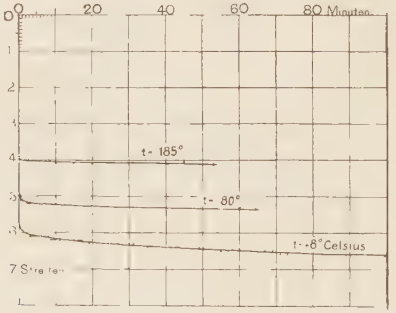


Fig. 23.

hier noch ca. $^1/_{10}$ Streifenbreite. Diese Kurven geben nun ziemlich genauen Aufschluß über das Verhalten der elastischen Nachwirkung eines nicht getemperten Bleistäbchens (s. S. 26) bei den drei Versuchstemperaturen.

Um andererseits darzutun, daß wir es bei diesen Versuchen tatsächlich mit reiner elastischer Nachwirkung zu tun haben, daß also keine dauernde Deformation vorhanden war, hätte man eigentlich die Entlastungskurven wiedergeben müssen. Statt ihrer ist in Fig. 24 eine graphische Zusammenstellung der Versuche gegeben. Wir finden hier die Lage der Entlastungskurve beim Abschluß eines jeden Versuches eingezeichnet, und zwar links oder rechts der Nullachse, je nachdem die Kurve diese bereits überschritten (was bei Stößen oder Temperatur-

änderungen[1]) während des Versuches eintreten konnte) oder noch nicht erreicht hatte. Der letzte Fall trat einmal ein, wenn die obengenannten Störungen den entgegengesetzten Sinn hatten. oder auch dann, wenn die Entlastung nicht lange genug beobachtet war.

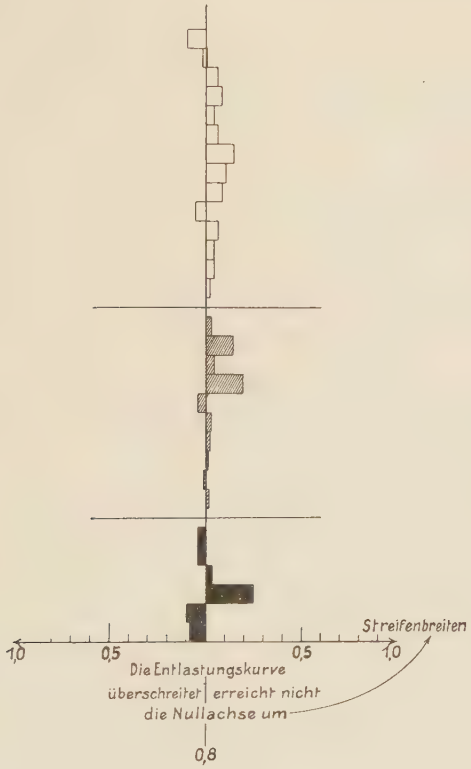


Fig. 24.

Auf jeden Fall geht aus der graphischen Darstellung hervor, daß die Entlastungskurven in den meisten Fällen bis auf etwa $^1/_{10}$ -Streifenbreite, den Fehler der Einzelmessungen, die Nullachse wieder erreichten, wodurch erwiesen sein dürfte, daß keine

[1]) Ich erinnere daran, daß wie S. 29 bemerkt, zur Zeit dieser Messungen Temperaturkonstanz nur durch Leitungswasser bewirkt wurde, dessen absolute Konstanz zu wünschen übrig ließ. Daher auch die Angabe: „8° C“.

dauernde Deformation die Beobachtungen getrübt, daß die Belastungskurven allein hinreichen, um aus ihnen die elastische Nachwirkung zu bestimmen. Bei den späteren Versuchen auf S. 37—45 können die Folgerungen betreffend die elastische Nachwirkung also ebenso aus den Be- wie aus den Entlastungskurven gezogen werden.

Da wir, wie schon früher (S. 19) bemerkt, nicht in der Lage sind, mit Sicherheit die elastische Dehnung von der elastischen Nachwirkung zu trennen, so wird auf Angaben über Änderung des Youngschen Moduls mit der Temperatur verzichtet und nur die elastische Nachwirkung diskutiert. Man findet, daß ihre Größe bei fallender Temperatur abnimmt. Gemäß der S. 19, Fußnote gegebenen Definition beträgt das Weiterwandern der Streifen

bei $t = +8^0$ C etwa 0,24 Streifenbreiten
„ -80^0 „ „ 0,075 „
„ -185^0 „ „ 0,05 „

Die elastische Nachwirkung nimmt demnach ab
auf ungefähr den dritten Teil ihres Wertes bei Zimmertemperatur beim Sinken der Temperatur auf -80^0,
auf ungefähr den fünften Teil ihres Wertes bei Zimmertemperatur beim Sinken der Temperatur auf -185^0.

Numerische Vergleichswerte früherer Beobachter sind nicht vorhanden. Allerdings hat Cl. Schäfer[1]) die elastische Nachwirkung (außer bei Al, Ag, Cu) auch bei Blei zu studieren versucht, aber wegen der Ungeeignetheit seiner Versuchsanordnung bei Blei nur eine bedeutende Abnahme der elastischen Nachwirkung gefunden, so daß sie nach seinen nur qualitativen Angaben bei $t = -185^0$ nicht mehr bemerkbar war.

Hiermit wäre eigentlich das vorgesteckte Ziel erreicht gewesen, doch schien es der Mühe wert, dem Grunde der Verminderung der elastischen Nachwirkung nach dem Tempern nachzuspüren, wovon vorher (S. 25) schon gesprochen ist.

[1]) Cl. Schäfer, Diss. Bonn 1900 und Ann. 5. 1901. p. 220.

Viertes Kapitel.

Einfluß der Vorgeschichte auf die elastische Nachwirkung.

Zur Klärung dieser Frage wurde eine große Anzahl von Versuchen angestellt, von denen hier die besten und am meisten charakteristischen Beobachtungen wiedergegeben sind, die übrigens alle bei Zimmertemperatur und bei fast stets gleicher Belastung (3,5 g) unternommen wurden. Auf Sonderfälle ist hingewiesen.

1. Zunächst zeigte sich, daß die Art des Anheizens und Abkühlens des elektrischen Ofens beim Tempern ohne Bedeutung war. Auch kam es nicht sonderlich auf die Höhe der Temperatur an. Es wurde festgestellt, daß hohe Wärmegrade (ca. 300° C), während kurzer Zeit (einige Minuten) wirkend, den gleichen Erfolg hatten wie Temperaturen von 200°, wenn diese einige Stunden lang angewandt wurden: stets ergab sich eine Verminderung der elastischen Nachwirkung nach dem Temperprozeß.

2. Sodann fand sich, daß die elastische Nachwirkung wieder anwächst, wenn das Stäbchen irgendwelche Deformationen erlitten hatte. Dabei war es gleichgültig, ob diese tiefer in sein Inneres gewirkt hatten, wie z. B. bei stärkerem Biegen, oder ob sie mehr oberflächlicher Natur waren, wie beim Abdrehen der äußersten Schichten. Zur Veranschaulichung dienen die folgenden Figuren. Die beobachteten Punkte auf den Kurven sind von nun an im Interesse der Übersichtlichkeit überhaupt nicht mehr angegeben. Die Kurven der Fig. 25 z. B. haben gegen 300 Einzelpunkte als Grundlage.

Es wurde, wie früher beschrieben, ein neues Stäbchen von ungefähr 60 mm Länge, 5 mm Breite, 1 mm Dicke durch Abdrehen hergestellt. Zwei Biegungsversuche ergaben die Kurven A und B mit bedeutender elastischer Nachwirkung. Der Deformationsrest bei diesen beiden Kurven dürfte sich erklären lassen durch (im Protokoll vermerkte) andauernde, von außen kommende Erschütterungen, die eine fortwährende Wanderung

des Streifensystems verursachten, und zwar im Sinne der Belastung. Die Belastungskurven erscheinen demnach zu steil, die Entlastungskurven zu flach. Darauf machte das Stäbchen eine Temperung durch, bei der man eine maximale Temperatur von 200° während 30 Minuten aufrecht erhielt. Bei dem dann folgenden Biegungsversuch (Kurven C. D) ergab sich eine bedeutende Abnahme der elastischen Nachwirkung. Bei Kurve C ist darauf hinzuweisen, daß infolge eines Ruckes beim Belasten (s. Anm. auf S. 32) eine etwas größere Durchbiegung gemessen und nach

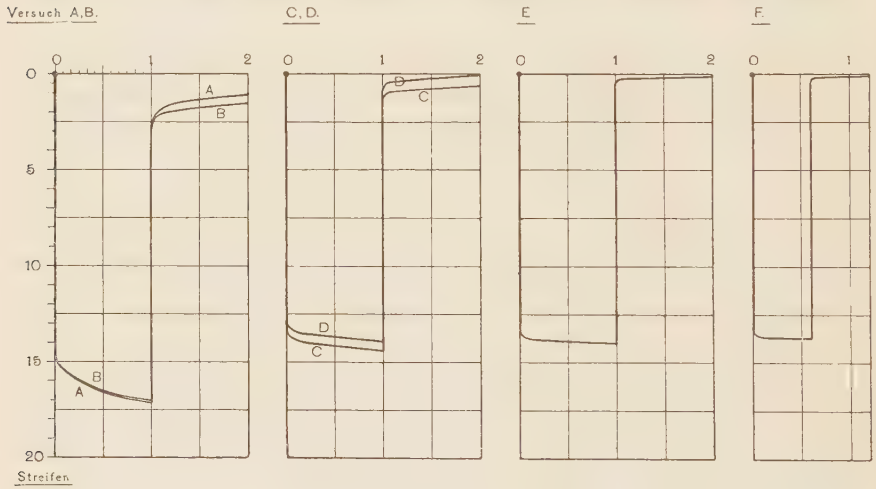


Fig. 25.

	Kurve	Versuchs-Nr.
Gedrehtes Stäbchen, roh	A, B	162, 163
Nach Temperung auf 200° . . .	C, D	167, 171
Nach Temperung auf 310° . . .	E	175
Nach Temperung auf 315° . . .	F	179

dem Entlasten dauernde Deformation vorgetäuscht wurde. Verschiebt man aber C um ungefähr 0,6 Streifenbreiten nach oben, so kommen C und D fast völlig zur Deckung.

Danach wurde das Stäbchen abermals getempert, die maximale Temperatur war während $^3/_4$ Stunden ca. 310°. Die dann aufgenommene Kurve E läßt eine abermalige Verminderung der elastischen Nachwirkung erkennen. Die folgende Temperung

(wenige Minuten bei maximal 315°) änderte die Verhältnisse nicht merklich (Kurve F).

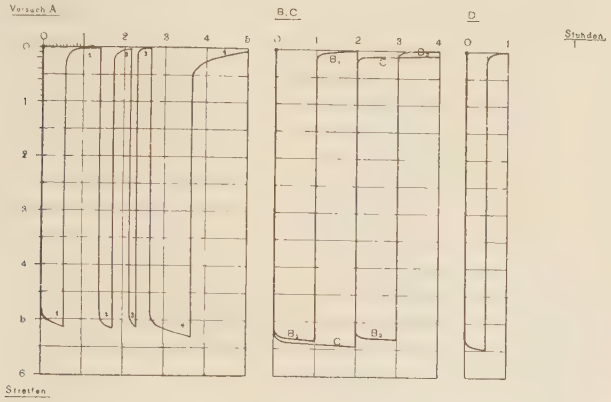


Fig. 26.

In Fig. 26 ist eine andere Beobachtungsreihe mitgeteilt. Nach der ausführlichen Beschreibung der letzten Versuche sei jetzt eine kürzere Darstellung gestattet.

Neues Stäbchen, abgedreht, Belastung: wie gewöhnlich 3,5 g, Dimensionen: Länge und Breite die gleiche wie vorhin, aber etwas dicker, infolgedessen kleinerer Biegungspfeil. Wieder alles bei Zimmertemperatur, gibt:

	Kurve A	Versuchs-Nr. 126–130
nach Temperung 60 Min. auf max. 310°:	B_1, B_2, C	132, 134, 135
nach abermalig. Temper. 60 Min. auf max. 310°:	D	136

Bei C ist wieder wegen eines Ruckes eine kleine Verschiebung vorzunehmen.

Durch die beiden Versuchsreihen war also der Einfluß der Temperung auf die elastische Nachwirkung aufgefunden. Die Stäbchen, die nach dem Abdrehen mit ihr behaftet waren, verloren dieselbe durch den Erhitzungsprozeß, vermutlich wurde das Gefüge homogener. Es galt nun zu prüfen, ob durch irgendwelche Deformation event. das Gefüge zerstört werden konnte, sich danach wieder größere elastische Nachwirkung einstellen würde. Die folgenden Beobachtungen geben hier Aufschluß, und es sei mit der Erläuterung der Fig. 27 begonnen.

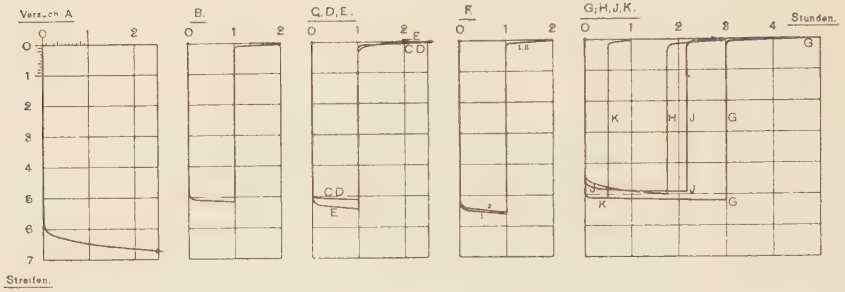


Fig. 27.

	Kurve	Versuchs-Nr.	Datum
Gedrehtes Stäbchen, roh	A	40—91	
Nach Temperung auf 310°	B	93	
Nach Deformierung:			
3 mal stärker gebogen als bei den Biegungsversuchen	C	98	
20 mal stärker gebogen als bei den Biegungsversuchen	D	103	
200 mal stärker gebogen als bei den Biegungsversuchen	E	107	
Nach Ätzung	F_1, F_2	108, 109	9./10. 2.
Nach 4 Tagen	G	110	14. 2.
Nach Deformierung:			
gebogen auf 50 mm Radius . . .	H	115	20. 2.
	J	118	24. 2.
	K	123	27. 2. 1910.

Die Versuche wurden an einem schon früher benutzten Stäbchen angestellt, und zwar entspricht Kurve A jener für $t = +8°$ in Fig. 23, die nach S. 35 keine dauernde Deformation enthält. Nach einer Temperung ergab sich Kurve B, wobei die elastische Nachwirkung wie immer abgenommen hatte. Nun wurde das Stäbchen absichtlich überanstrengt, und zwar wurde es zunächst 3 mal (vor Kurve C), dann 20 mal (vor Kurve D) stärker gebogen als bei den Beobachtungen, so daß im ersten Falle ca. 15, im zweiten ca. 100 Streifen das Gesichtsfeld durchwanderten. Diese Überbelastung wurde einige Minuten wirken gelassen und nach einer Pause die bezüglichen Kurven C und D aufgenommen. Vor Versuch E erlitt das Stäbchen eine unbeabsichtigte Biegung, welche eine rund 10 mal größere Beanspruchung darstellte als die beim letzten Versuch D.

Die Überbeanspruchung bei C und D war zu schwach, um Änderung der früheren Werte zu geben, hingegen zeigt E merkliche Zunahme der elastischen Nachwirkung. Bei Kurve E ist auf folgendes aufmerksam zu machen: Die Beobachtung wurde nur 12 Stunden nach der Beanspruchung begonnen. Die Kurve E ist daher noch überlagert von der elastischen Nachwirkung jener Biegung. Infolgedessen fällt der beim Belasten gemessene Ast zu wagerecht aus, während die Kurve beim Entlasten zu steil in die Höhe geht und noch 50 Minuten sogar die Nullachse schneidet.

Damals tauchte der Gedanke auf, es könne die Verminderung der elastischen Nachwirkung vielleicht erklärt werden durch die beim Tempern entstehende Oxydhaut, die sicherlich ganz andere elastische Eigenschaften wie das Blei selbst hatte. Darum wurde die Oxydschicht mit heißer Kalilauge abgebeizt, bis das blanke Blei zum Vorschein kam. Die zwei Versuche F_1 und F_2 erweisen die Unrichtigkeit dieser Annahme.

Nach einer Pause von vier Tagen gewann ich Kurve G, wobei sich eine ähnlich geringe elastische Nachwirkung zeigt wie nach einem Temperprozeß. Hier hat also die viertägige Ruhepause bei Zimmertemperatur die gleiche Wirkung gehabt wie eine Erhitzung. Im zweiten und vierten Teil der vorliegenden Arbeit wird auf diese interessante Tatsache noch zurückzukommen sein. Nachdem das Stäbchen auf einen Zylinder von 50 mm Radius gebogen war, ergaben sich die Kurven H, J, K vom 20., 24., 27. Februar 1910. Wieder tritt nach der Deformation elastische Nachwirkung auf, die bereits nach vier Tagen merklich abgenommen hat.

Wie die Versuchsreihe zeigt, hatte die erwartete „Strukturzerreißung“ tatsächlich stattgefunden, damit zusammenhängend war Vergrößerung der elastischen Nachwirkung eingetreten. Ferner war Abnahme der Nachwirkung beobachtet, wenn das Stäbchen einige Zeit bei Zimmertemperatur ruhig gelegen hatte.

Bei diesen Studien wurde mein Augenmerk auf die beim Abätzen der Oxydhaut zutage getretenen „Ätzfiguren“ gerichtet, und ich kam dabei zur Vermutung, daß das verschiedene elastische Verhalten der ungetemperten und getemperten Stäbchen durch

verschiedenen molekülaren Bau des Bleies zu erklären sei. Damit soll aber nicht gesagt werden, daß hier verschiedene allotrope Modifikationen[1]) des Bleies angenommen werden müßten. Diese Frage ist in der vorliegenden Arbeit überhaupt nicht berührt worden.

Gelegentlich der eben besprochenen Entfernung der Oxydhaut kamen also die Ätzfiguren zum Vorschein. Dabei fiel der Unterschied der Figuren bei dem getemperten Stäbchen und verschiedenen anderen Stücken auf, welche probeweise mitgeätzt waren. Während dabei an Stellen, wo der Drehstahl gearbeitet, also eine (oberflächliche) Deformation stattgefunden hatte, kleinflächige Figuren auftraten, zeigten sich großflächige Gebilde sowohl an unbearbeiteten Stellen, als auch an dem getemperten Stäbchen. Die Frage der Ätzfiguren ist später eingehend untersucht und soll gleich im Zusammenhang beschrieben werden.

Die Tatsache aber, daß an den unbearbeiteten Flächen und an dem getemperten Stäbchen die gleichen Ätzfiguren auftraten, regte den schon früher (S. 25) gehegten Wunsch wieder an, fertig gegossene, also nicht weiter bearbeitete Stäbchen in den Bereich der Untersuchung zu ziehen. An ihnen durfte sich keine elastische Nachwirkung zeigen. Nach verschiedenen Bemühungen gelang es endlich, tadellose Stäbchen durch Guß in Aluminiumformen zu erzeugen. Die Figuren 28 und 29 geben das Resultat der an gegossenen Stäbchen gemachten Biegungsversuche.

Gleichzeitig wurde noch ein anderer Gesichtspunkt in den Bereich der Untersuchung gezogen, nämlich der, wie sich verschiedene Bleisorten verhielten. Während bisher ein mäßig reines Produkt (1 kg = 4,50 Mk.) von Kahlbaum benutzt war, kam nun dessen beste Sorte (1 kg = 45,00 Mk.) zur Verwendung. Mit großer Sorgfalt wurde in die im elektrischen Ofen angewärmte Aluminiumform ein Stäbchen von den üblichen Dimensionen gegossen.

[1]) W. A. Kahlbaum, Z. f. anorg. Chem. 46. 1905. p. 217; O. Lehmann, Z. f. Krist. 17. 1890. p. 274; Roberts-Austen, Nature 39. p. 83; Faust und Thammann, Z. f. phys. Chem. 75. 1910. p. 108; E. Cohen und Katsuje Inouye, Z. f. phys. Chem. 74. 1910. p. 202.

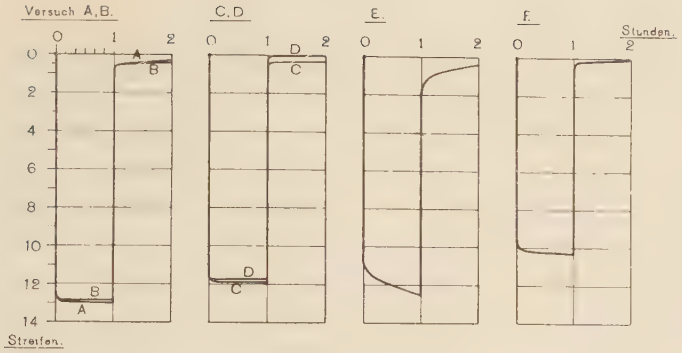


Fig. 28.

	Kurve	Versuchs-Nr.
Gegossene Stäbchen	A, B	184, 185
Getempert	C, D	187, 188
Stäbchen abgedreht	E*)	195
Wieder getempert	F*)	197

*) Ermäßigte Belastung.

Die beiden Versuche A, B in Fig. 28 zeigen, wie nach dem vorhin Gesagten wohl zu erwarten war, sehr kleine elastische Nachwirkung. Die Temperung auf 290° ergibt die Kurven C und D. Nachdem nun mit großer Vorsicht die äußerste Oberflächenschicht auf beiden Breitseiten des Stäbchens abgedreht war, kam wieder (mit ermäßigter Belastung) enorme elastische Nachwirkung zum Vorschein (Kurve E). Eine darauffolgende Temperung hatte den hinreichend bekannten Erfolg der Abnahme der elastischen Nachwirkung (Kurve F). Hierdurch war nachgewiesen: erstens, daß die elastische Nachwirkung außer durch Biegungsbeanspruchung auch hervorgerufen wird durch die oberflächliche Deformation beim Abdrehen der Flächen, zweitens, daß die Reinheit des Bleies keinen merklichen Einfluß hat.

Ein weiterer Versuch bestätigte diese beiden Tatsachen. Ein anderes Stäbchen, aus Blei von einem alten Bleirohr, in der Aluminiumform gegossen, zeigte das gleiche Verhalten wie jenes aus reinstem Blei (s. Kurven A und B in Fig. 29).

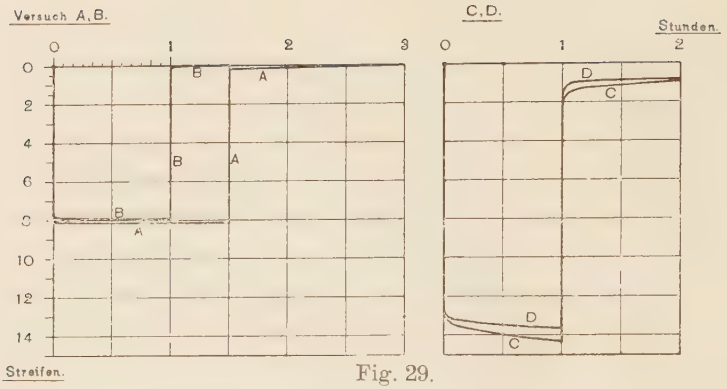


Fig. 29.

	Kurve	Versuchs-Nr.
Gegossenes Stäbchen . . .	A	189
	B	190
Abgedreht	C	191
Getempert	D	192

Nachdem, wie oben beschrieben, seine Oberfläche abgedreht war, trat wieder die enorme elastische Nachwirkung in die Erscheinung (Kurve C) und verschwand teilweise durch Tempern (Kurve D).

Diese Studien wurden abgeschlossen durch Versuche an einem schon früher benutzten Stäbchen.

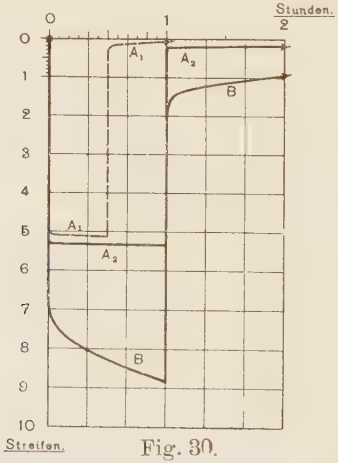


Fig. 30.

	Kurve	Versuchs-Nr.
Altes Stäbchen	A_1	123
Hochgetempert	A_2	200
Auf 6 mm Radius gebogen .	B	202

In Fig. 30 entspricht Kurve A_1 der Kurve K von Fig. 27. Hier ist nur geringe elastische Nachwirkung wahrnehmbar. Nach längerer Pause wurde das Stäbchen bis an den Schmelzpunkt des Bleies heran erhitzt. Darauf war kaum mehr etwas von der elastischen Nachwirkung vorhanden (Kurve A_2).[1]) Das Stäbchen verhielt sich wie ein gegossenes. Während die letzten Male das Gefüge sozusagen „zerrissen“ worden war durch das Abdrehen der breiten Seiten, so geschah dies jetzt wie bei den Versuchen in Fig. 29 dadurch, daß das Bleistäbchen auf einen Rundstab von 6 mm Radius aufgewickelt und wieder geradegestreckt wurde. Danach ergab sich Kurve B mit ganz enormer elastischer Nachwirkung.

Ehe ich mich nun anderen Untersuchungen zuwende, die im innigen Zusammenhang mit dem Vorigen stehen, sollen noch einmal die hauptsächlichsten Ergebnisse der Biegungsversuche zusammengefaßt werden.

Zusammenfassung.

A. Die S. 19, Fußnote definierte elastische Nachwirkung nimmt bei den Temperaturen des Alkohol-Kohlensäurebades bezw. der flüssigen Luft ab auf den dritten bezw. fünften Teil ihres Betrages bei Zimmertemperatur.

B. 1. Nach erheblicher Deformation, wie Abdrehen beim Herstellen der Stäbchen oder beim Biegen derselben, tritt elastische Nachwirkung auf.

2. Die so hervorgerufene elastische Nachwirkung wird nach dem Tempern oder längerem Stehenbleiben (einige Tage) bei gewöhnlicher Temperatur verkleinert und verschwindet gänzlich, wenn man beim Tempern die Temperatur bis zum Schmelzpunkt steigert, bei Zimmertemperatur vermutlich nach sehr langer Zeit.

3. Die elastische Nachwirkung ist schon von Anfang an sehr klein, wenn man gegossene Stäbchen untersucht.

4. Die Reinheit des Materiales ist belanglos.

[1]) Kurve A_2 ist wieder wegen eines (im Journal verzeichneten) Ruckes um ca. $^2/_{10}$ Streifenbreiten aufwärts zu verschieben.

Zweiter Teil.

Über die Mikrostruktur des getemperten und deformierten Bleies.[1]

Daß das eben gekennzeichnete elastische Verhalten irgendwie mit der „Struktur" zusammenhängen müsse, war schon bei der erstmaligen Beobachtung der Ätzfiguren bemerkt worden. Überhaupt sind vorher des öfteren Ausdrücke wie „innere Spannung", „Inhomogenität" oder „Struktur zerreißen" gebraucht. Schon aus den Versuchen der Fig. 27 konnte man schließen, daß dieselben nicht ganz unberechtigt waren, und es soll jetzt des näheren von der Struktur der verschiedenen Bleisorten die Rede sein.

Es war also die Frage zu beantworten, wie das Kleingefüge bei den verschiedenen untersuchten Stäbchen (gedrehten, gegossenen, getemperten, gebogenen) wohl beschaffen gewesen sei. Ich bediente mich dabei der wichtigsten Disziplin der metallographischen Praxis, nämlich der Mikrophotographie der Ätzfiguren. Die Probekörper wurden nach den an ihnen vorgenommenen Operationen geätzt, und zwar mit heißer Kalilauge, wenn man lediglich die Struktur auf der Oberfläche haben wollte, oder mit Salpetersäure, wenn es darum zu tun war, tiefere Schichten des Bleies bloßzulegen. Bisweilen wurden auch die Proben als Anode in einer Bleinitratlösung elektrolysiert, um das Gefüge in wesentlich tiefer liegenden Schichten zugänglich zu machen. Die Proben wurden nach dem Ätzen abgespült, durch Betupfen mit einem weichen Tuch getrocknet und kamen alsdann auf den Tisch des mikrophotographischen Apparates. Derselbe war improvisiert aus einem einfachen, älteren Mikroskop (von Amend-Berlin), vor

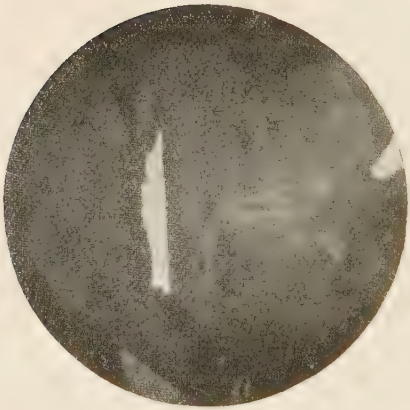
[1] H. A. Miers, Über Kristallformen d. Bl., Z. f. Kr. 31. 1899. p. 583; I. C. W. Humfrey, Wirkung einer Spannung auf die krist. Struktur des Bleies. Z. f. Krist. 41. 1906 (Referat); O. Lehmann, Elektrolytische Kristallisation und Dimorphie von Blei, Z. f. Krist. 17. 1890. p. 274; Roberts-Austen, Allotropie reiner Metalle (Bolleys Blei), Nature 39. p. 83, Chem. News 58. p. 235/36; A. Hamberg, Über kristallisiertes Blei von den Gruben Harstingen, Z. f. Krist. 17. 1890. p. 253.

dessen Okular eine photographische Kamera (ohne Objektiv) passend aufgestellt war. Die Beleuchtung geschah durch einen Nernst-Brenner, dessen Licht auf die zu untersuchende Stelle konzentriert wurde, und zwar mußten die Aufnahmen mit schräger Lichtinzidenz gemacht werden, da kein Vertikal-Illuminator zur Verfügung stand. Infolgedessen war die Vergrößerungsmöglichkeit nur eine begrenzte. Eisenberger-Reformplatten, später Flavin-Platten unter Benutzung eines Kaliumbichromatfilters (meist mit Metholhydrochinon entwickelt) wurden als Aufnahmematerial gebraucht. Aus der großen Anzahl der im Laufe der Untersuchung gewonnenen Aufnahmen führe ich im folgenden einige besonders charakteristische Serien vor.

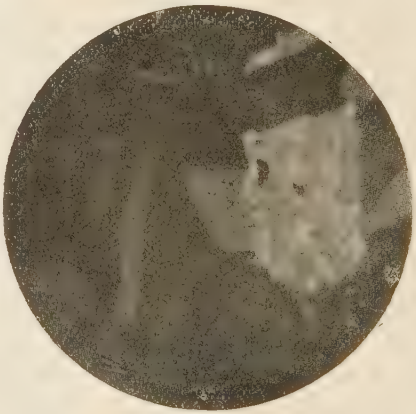
Serie A: ca. 50fache Vergrößerung.

1.

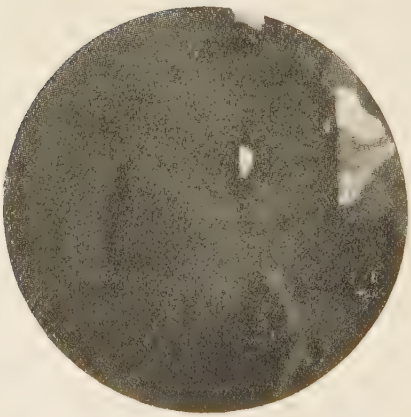
2



3.



4.



5.

6

Serie A:

Ein Bleistück wurde poliert, bei ca. 300° getempert, dann mit Salpetersäure geätzt. Es wurde immer die gleiche Stelle photographiert, dabei aber von verschiedenen Seiten beleuchtet. Die verschiedenen Felder leuchten je nach Lichteinfall auf oder werden dunkel, woraus zu ersehen ist, daß die Einzelindividuen, die solche Flächen zusammensetzen, gleiche Orientierung innerhalb der Felder, verschiedene Orientierung von Feld zu Feld besitzen. Aufnahme 1—5.

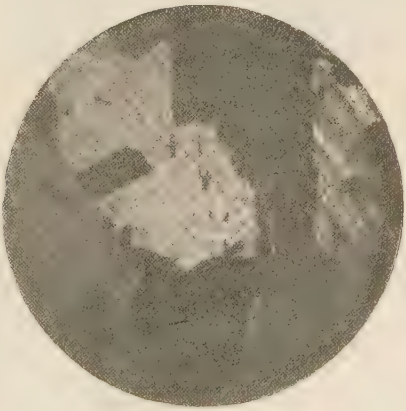
Gewisse Flächen der einzelnen kleinen Kriställchen in einem größeren Feld sind mit 300facher Vergrößerung in Aufnahme 6 abgebildet.

Serie B: ca. 30fache Vergrößerung.

1.

2.

3.



4.

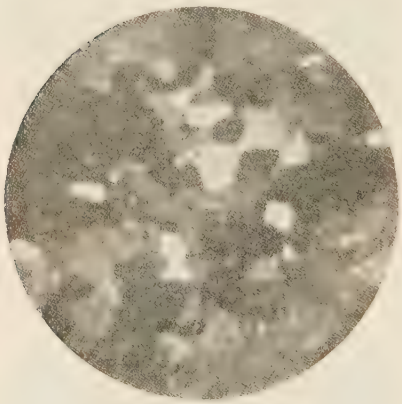
Serie B:

Ziemlich reines Blei, gegossen, dann die Oberfläche abgedreht, durch vier Furchen eine ungefähr $^1/_4$ qmm große Stelle fixiert, die in Aufnahme 1—3 zu sehen ist.

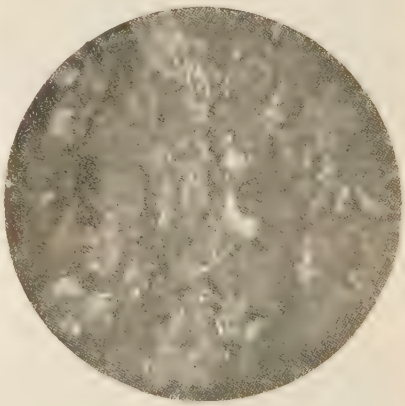
Aufnahme:	Es zeigen sich:
1. Oberfläche mit Salpetersäure geätzt.	kleinflächiges Kristallgefüge;
2. Nach 10 Minuten langer Temperung auf 300°, mit Kalilauge geätzt.	großflächiges Kristallgefüge;
3. Genau wie 2, aber geänderte Beleuchtung.	andere Felder werden erhellt;
4. Wie 2 und 3, aber andere Stelle.	besonders schön ausgeprägte großflächige Gebilde.

Die Aufnahmen beweisen, daß das beim Bearbeiten (Abdrehen) oberflächlich deformierte Blei kleinflächige, das getemperte großflächige Struktur besitzt.

Serie C: ca. 30fache Vergrößerung.



1.



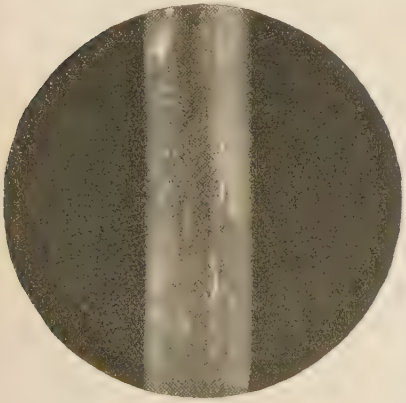
2.

Bleistück, mit Messer eben geschnitten, zur Fixierung der aufzunehmenden Stellen fünf Kreismarken von je ca. 1 mm Durchmesser angebracht, das Gebiet in denselben photographiert; hier nur zwei Bilder einer einzigen Marke wiedergegeben.

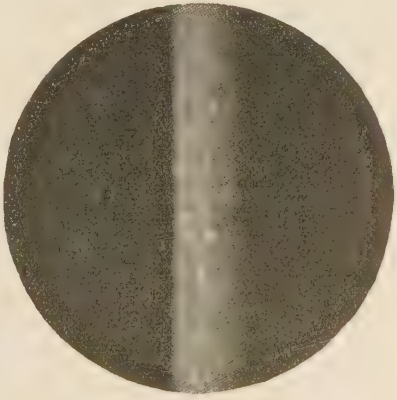
Aufnahme:	Es zeigt sich:
1. Nach 10 Minuten langer Temperung auf 300°, dann mit Salpetersäure geätzt.	großkristallinisches Gefüge.
2. Nach Biegen des Bleistückes, mit Salpetersäure geätzt.	Die großen Kristallaggregate sind zerrissen.

Resultat: Durch Deformieren beim Biegen tritt Zerreißen der Struktur ein. Ich bin hier mit Humfrey[1]) in Übereinstimmung, welcher fand, daß beim Biegen eines Gußbleistückes die großen Felder in mehrere mit verschiedener Orientierung der Kristallite zerfallen. Nach längerer Erwärmung eines deformierten Bleistückes auf 100° beobachtet er Umkristallisation, Entstehen bezw. Vermehrung der gleich orientierten Felder.

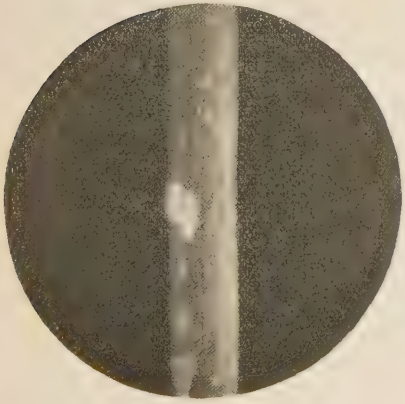
Serie D: ca. 20fache Vergrößerung.



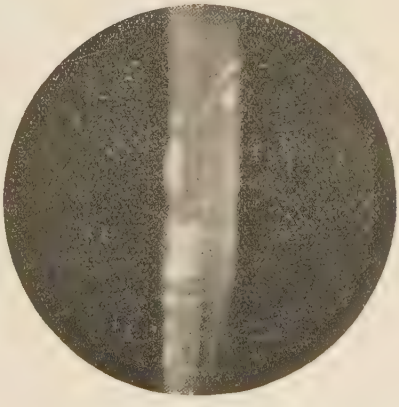
1.



2.



3.



4.

[1]) l. c.

Serie D:

Auch Drähte wurden untersucht. Selbst gezogener Bleidraht, geätzt mit Salpetersäure. Aufnahme 1 und 2: an zwei verschiedenen Stellen: Man bemerkt kleinflächiges Gefüge. Aufnahme 3 und 4: derselbe Draht, nach dem Tempern mit Salpetersäure geätzt: es sind großflächige Gebilde entstanden. Diese waren, wie die direkte Beobachtung lehrte, nicht etwa spiegelnde, durch Quetschen oder Drücken hervorgebrachte Flächen, sondern wirkliche Ätzfiguren, die übrigens mit dem Auge leichter wahrzunehmen, als zu photographieren waren.

Alle diese Aufnahmen zeigen, daß bei deformiertem Blei die Ätzfiguren kleinflächig, bei nicht deformiertem bezw. getempertem Blei die Ätzfiguren großflächig sind. Bei den früheren Biegungsversuchen war also die elastische Nachwirkung mit der Größe der Kristallkörner verknüpft, und zwar derart, daß Blei mit großflächigen Ätzfiguren geringe elastische Nachwirkung, jenes mit kleinflächigen Figuren dagegen elastische Nachwirkung besaß.

Hier ist es auch am Platze, auf die Versuche der Fig. 27 zurückzugreifen. Dort war zweimal beobachtet, daß die elastische Nachwirkung im Lauf von einigen Tagen von selbst abnahm, ohne daß eine Temperung stattgefunden hatte. Es ließ sich also erwarten, daß beim ruhigen Stehen eines getemperten Bleistückes bei Zimmertemperatur mit der Zeit die gleiche Strukturänderung auftreten würde, die nach dem Tempern gefunden war. Es wurden zu diesem Zweck zwei Versuchsreihen gemacht, bei denen es den Anschein erweckte, als ob bereits nach 24 Stunden eine Änderung der Struktur stattgefunden hätte. Indessen waren die Änderungen nicht sehr bedeutend. Andererseits wurde aber an vier Proben konstatiert, daß nach ruhigem Stehenbleiben eines Bleiblockes bei Zimmertemperatur nach ein bis zwei Monaten das vorher kleinflächige Gefüge zu ganz großen Feldern zusammengeflossen war. Die gleiche Beobachtung, daß bei gewöhnlicher Temperatur, aber viel langsamer, eine Umkristallisation stattfindet, ist auch von Humfrey[1]) gemacht.

Bei dieser Gelegenheit verdienen auch die mannigfachen

[1]) l. c.

Studien des Kgl. Materialprüfungsamtes, Berlin-Lichterfelde, sowie die Arbeiten von Roberts-Austen und Kirke Rose[1]) Erwähnung. Speziell möchte ich auf einige Photogramme[2]) hinweisen, die im Charakter große Ähnlichkeit mit meinen Aufnahmen von ungetempertem und getempertem Blei haben, welche Ätzungen an der Goldlegierung der englischen Münzen darstellen. Die Verfasser fanden kleinflächiges, nach zweimonatlichem Erhitzen auf Rotglut großflächiges Gefüge, wie von mir beim Blei beobachtet. Ein gleiches Beispiel für die Vergrößerung des Kristallkornes bietet Gewecke,[3]) der Kupferdrähte untersuchte. Einige seiner Aufnahmen zeigen die Struktur eines 0,5 mm dicken Drahtes mit kleinen Kristallfeldern. Diese sind nach einer Erhitzung auf 350° und weiter nochmals auf 600° jedesmal bedeutend gewachsen.

Vor Abschluß dieses Kapitels soll noch eine Entdeckung[4]) erwähnt werden, die vielleicht in Zukunft von Bedeutung für die metallographische Forschung werden könnte. Läßt man ein dünnes X-Strahlenbündel auf einen Kristall auffallen, so wird die auftreffende Strahlung teilweise abgebeugt. Stellt man an geeigneter Stelle hinter dem Kristall eine photographische Platte auf, so wird diese an den Auftreffpunkten der sekundären Strahlen geschwärzt. Aus dem so erhaltenen Bild lassen sich Schlüsse auf die Lage der kristallographischen Achsen sowie die Symmetrieverhältnisse des betreffenden Kristalles ziehen. Wir haben uns durch Versuche an einem Kupferkristall, ich selbst mich durch Versuche an langsam niedergeschlagenem Elektrolytkupfer und einem Bleibaum davon überzeugt, daß auch bei kristallisierten Metallen ein Bild auf der Platte erhalten werden kann. Speziell habe ich, um ein Beispiel zu erwähnen, gefunden, daß senkrecht

[1]) Roy. Soc. London 1901. 1903, s. auch Fortschr. 59. 1903. p. 694.

[2]) Nature 67. 1903, 286.

[3]) Gewecke, Diss. Darmstadt 1910.

[4]) Friedrich, Knipping, Laue, Sitzungsber. d. K. B. Akad. d. W. 1912. p. 303. Laue, Sitzungsber. d. K. B. Akad. d. W. 1912. p. 362. Man vergleiche auch die inzwischen erschienene Arbeit von Herrn Hupka: „Über den Durchgang von Röntgenstrahlen durch Metalle", Phys. Zeitschr. 1913. p. 623, sowie eine demnächst an gleicher Stelle erscheinende Stelle von mir über den gleichen Gegenstand.

zur Wachstumsebene eines Bleibaumes eine dreizählige Symmetrieachse liegt. Diese Entdeckung wird uns vielleicht später die Möglichkeit liefern, einen tieferen Einblick in den Aufbau der festen, kristallisierten Materie, auch der Metalle, zu tun und Fragen zu entscheiden, die jetzt noch offen sind.

Ein Punkt verdient noch der Erwähnung: Man könnte den Einwand erheben, daß bei den Ätzversuchen nicht reines Blei, sondern eine, vielleicht hochprozentige, Bleilegierung vorgelegen hätte. In diesem Falle würde man es nur mit den längst bekannten Strukturänderungen einer Legierung[1]) zu tun gehabt haben. Bei den meisten Versuchen gelangte Blei Kahlbaum, Sorte II (1 kg = 4,50 Mk.), manchmal gemeines Handelsblei zur Verwendung; einmal wurde auch das reinste Kahlbaumsche Blei untersucht. Aber immer wieder wurde der gleiche Charakter der Ätzfiguren gefunden. Das scheint mir ein Beweis dafür zu sein, daß wir es mit Strukturänderungen des Bleies selbst zu tun haben.[2])

Das Ergebnis dieser Untersuchungen läßt sich in die folgenden Sätze zusammenfassen:

Es gibt Blei mit großflächigen, ein anderes mit kleinflächigen Ätzfiguren. Die elastische Nachwirkung steht im Zusammenhang mit der Größe der Kristallite; je kleiner diese, um so größer die elastische Nachwirkung. Speziell wurde gefunden:

1. Die Ätzfiguren an nicht deformiertem Blei sind großflächig.
2. Sowie eine ein gewisses Maß übersteigende Deformation stattgefunden hat, zerfallen diese großflächigen Gebilde in kleinere.
3. Bei der Temperung tritt Umkristallisation ein, wobei die kleinsten Teilchen sich wieder in großflächigen Aggregaten anordnen.
4. Bei langdauerndem Stehenbleiben bei Zimmertemperatur tritt die gleiche Erscheinung ein.

Nachdem durch die Biegungsversuche und die Untersuchung der Ätzfiguren die Annahme ihre Bestätigung gefunden hatte,

[1]) B. Dessau, Legierungen, Wissenschaft Bd. 33.

[2]) Übrigens habe ich ähnliche Figuren wie die Ätzfiguren beim Blei auch an frischen Schnittflächen von reinem Kalium und Natrium beobachtet.

daß es zwei Eigenschaften von Blei gebe, erhob sich die Frage, ob an anderen Eigenschaften, wie Leitfähigkeit oder Thermokraft, spezifische Wärme, Dichte, Torsionsmodul u. a. m., auch die Verschiedenheit der Struktur erkennbar wäre. In der vorliegenden Arbeit habe ich mich vorläufig damit befaßt, Beobachtungen über den Einfluß der Deformation bezw. Temperung auf die Dichte und den Torsionsmodul anzustellen. Den erstgenannten Untersuchungen wandte ich mich zunächst zu.

Dritter Teil.

Dichteänderungen.

Hierauf wurde der Versuch unternommen, den Einfluß des inneren Aufbaues des Bleies auf das spezifische Gewicht zu ermitteln. Die Dichte selbst wurde einmal und nur nebenbei gemessen und in guter Übereinstimmung mit früheren Beobachtungen gefunden, im übrigen aber nur relativen Änderungen der Dichte nachgeforscht. Dabei bediente ich mich einer Differenzmethode, bei welcher alle jene Fehlerquellen sich herausheben, die man bei absoluten Beobachtungen hätte berücksichtigen müssen. Die Wägungen wurden bei steter Funktion des Thermoregulators, also bei konstanter Temperatur ausgeführt.

Es wurden zwei längere Beobachtungsreihen angestellt; bei der ersten gelangte eine kurzarmige Bungesche Wage zur Anwendung, während bei den späteren Messungen eine ältere, aber vortreffliche 1000 g-Wage von Stollenreuther benutzt wurde. Sie war mit einem Pappkasten umhüllt, so daß Wärmestrahlung und dadurch hervorgerufene Störung ausgeschlossen war. Die Ablesung geschah durch einen Lichtzeiger an einer 1,5 m entfernten Skala. Bei beiden Beobachtungsreihen wurde der durch Tempern oder Deformieren hervorgebrachte Dichteunterschied von je einem Paar gleich großer und genau gleich schwerer Bleiplatten bestimmt. Diese waren aus einem größeren Gußblock heraus geschnitten und durch Abdrehen mit ebenen Flächen versehen worden. Jedes der Stücke hing dauernd an einem fettfreien Haar, welches vorher längere Zeit in destilliertem

Wasser gelegen hatte. Bestimmt wurde die Differenz dieser beiden Bleistücke in Wasser und in Luft vor und nach einer Deformation bezw. Temperung. Getempert wurde wie immer im elektrischen Ofen, deformiert durch mehrmaliges Zusammen- und Wiederaufrollen der Bleiplatten. (Dimensionen: ca. 70 mm lang, ca. 20 mm breit, ca. 1,5 mm dick, rund 30 g schwer.) Dies geschah mit der größten Vorsicht; die Bleistücke wurden nur mit sauberen Tüchern angefaßt.

Bei der zweiten Serie wurde auch fortgesetzt das Einzelgewicht der Platten bestimmt, welches sich durch die Temperung oder längeres Stehenbleiben im Wasser geändert hatte. Nach dem Tempern wurde, wahrscheinlich infolge von Sauerstoffaufnahme in der Oberfläche, regelmäßig eine Gewichtszunahme beobachtet, die bis zu 0,03 ‰ erreichte. Andererseits verringerte sich das Gewicht der im Wasser hängenden Platten im Laufe der Zeit merklich infolge der Auflösung des Bleies im Wasser, obwohl dieses destilliert und durch Auskochen und Luftabsaugen von allen Gasen befreit war. Der Verlust hat in einem bestimmten Falle in 24 Stunden 0,3 ‰ betragen.

Als Resultat der beiden Beobachtungsreihen ist hier (in runden Zahlen) die Änderung des spezifischen Gewichtes angegeben:

Serie I.

nach dem Tempern . . . . . — 0,5 ‰, entsprechend — 18 mg
nach dem Deformieren . . . . + 0,6 ‰, entsprechend + 21 mg
} auf 27,6 g

Serie II.

nach dem Tempern . . . . . — 0,07 ‰, entsprechend — 1,9 mg
nach dem Deformieren . . . . + 0,07 ‰, entsprechend + 1,9 mg
} auf 35,7 g

Die Fehler betragen dabei in Prozenten der gemessenen Änderung bei Serie I: ± 50 bis 60 %, bei Serie II: ± 40 bis 50 %.

Durch das Tempern wird also das Material aufgelockert, durch das Deformieren verdichtet.

Folgender Punkt ist noch erwähnenswert: Bei beiden Beobachtungsreihen ist der Effekt von der gleichen Größe, jedoch ist es auffallend, daß bei der zweiten Serie die Größenordnung bedeutend kleiner ist als bei der ersten. Eine sichere Erklärung

hierfür ist nicht anzugeben, jedoch steht zu vermuten, daß die Vernachlässigung der Einzelwägungen bei der ersten Serie hierfür verantwortlich zu machen ist. Die Zahlen der zweiten Reihe scheinen also das größere Zutrauen zu verdienen.

Da frühere Beobachter [1]) mit anders behandeltem (destilliertem und hochgradig gepreßtem) Material Versuche anstellten, und weil in der Frage der Änderung des spezifischen Gewichtes die verschiedenen Beobachter zu widersprechenden Resultaten gelangt sind, soll auf Vergleiche verzichtet werden.

Vierter Teil.

Dämpfung bei Torsionsschwingungen.

Am leichtesten glaubte ich den Einfluß der Struktur bei Torsionsschwingungen nachweisen zu können, da schon meine längere Zeit zurückliegenden Vorversuche positive Resultate gezeitigt hatten. Ich machte mich also daran, nochmals genauere Messungen vorzunehmen, und zwar nach der Schwingungsmethode, weil bei der statischen die elastische Nachwirkung wohl zu sehr gestört hätte. Die Untersuchungen wurden an zwei käuflichen Drähten aus ziemlich reinem Blei (Schmelzpunkt in der Gegend von 325°) angestellt. Das obere Ende eines solchen Drahtes (von ca. 50 cm Länge und 1,2 mm Durchmesser) war mit sehr wenig Lot eingelötet in die 1,3 mm weite Bohrung einer Schraube (s. Fig. 31). Diese paßte in ein zentrales Gewinde einer Fahrradachse, deren Nabe an einem stabilen dreibeinigen Stativ angebracht war. Ein an der Achse befestigter Arm wurde von einer Feder gegen einen Anschlag gezogen. Wollte man Schwingungen hervorrufen, so wurde der Arm ein wenig hin- und herbewegt. Durch diese Art der Anregung der Torsionsschwingungen ist ein Pendeln des Systemes vermieden worden. An dem unteren Ende des Drahtes hing unter Vermittlung einer gleichen Schraube

[1]) W. A. Kahlbaum, Roth und Siedler, Z. f. anorg. Chem. 29. 1902. p. 278; W. A. Kahlbaum und E. Sturm, Z. f. anorg. Chem. 46. 1905. p. 217; M. Spring, Journ. de Chim. Phys. 1904, p. 605; Marchand und Scheerer, Journ. prakt. Chem. 27. 1842. p. 209.

wie am oberen Ende das Torsionsgewicht, in der Hauptsache aus einer Messingscheibe und einem darunter befindlichen Bleiring bestehend. Der Bleidraht war in der Regel nur während des Beobachtens belastet! An dem Gewicht befand sich ein Hohlspiegel, (ein versilbertes Monokel von 4 m Brennweite), welcher das Bild eines in passendem Abstand aufgestellten und teilweise abgeblendeten Nernstschen Glühkörpers auf eine photographische Platte projizierte. Diese wurde in einen Rahmen gesetzt, der an einer Schienenführung von einem mit Geschwindigkeitsregulator versehenen Uhrwerk (aus einem Phonographen) hinaufgezogen

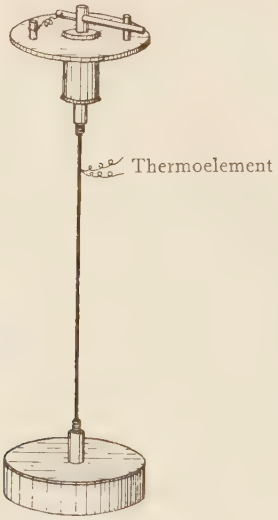


Fig. 31.

wurde. Der Lichtpunkt zeichnete dann bei Torsionsschwingungen Zickzacklinien auf der Platte auf. An ihrem Rande befinden sich zur Kontrolle der Schwingungsdauer bei den einzelnen Aufnahmen Zeitmarken, die folgendermaßen erzeugt wurden:

An einem improvisierten Pendel von nahezu 1 Sek. Schwingungsdauer wurde ein Wechselstromkontakt angebracht (s. Fig. 32). Der erzeugte Wechselstrom ging zu einem Relais, auf dessen Anker ein kleiner Hohlspiegel geklebt war. Dieser führte im Tempo der Pendelschwingungen ruckende Bewegungen aus und lenkte dadurch einen Hilfslichtstrahl auf die Platte oder an ihr

vorbei. So wurde erreicht, daß die geraden Sekunden als scharf begrenzte Schwärzung am Plattenrand erscheinen.

Ferner war ein weiterer Stromkreis vorhanden: Wenn die Torsionsschwingungen angeregt waren und die Aufnahme beginnen sollte, wurde dieser geschlossen. Ein Elektromagnet zog dann ein bis dahin in den Strahlengang gehaltenes rotes Glas weg, so daß die Belichtung der Platte erfolgen konnte. Ein zweiter Elektromagnet löste gleichzeitig das Uhrwerk aus, welches den Transport der Platte zu besorgen hatte.

Die feinen Linien in den Aufnahmen, die nur eine grobe Schätzung der Schwingungsamplituden ermöglichen sollen, rühren

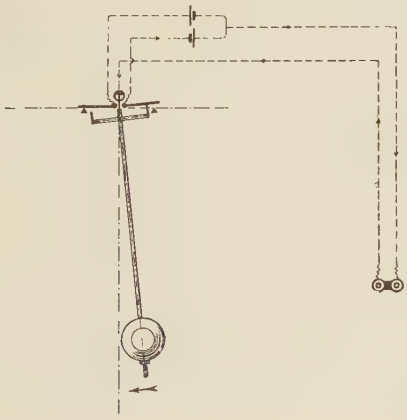


Fig. 32.

von einem Glasmaßstab her, der unmittelbar vor der Platte aufgestellt war.

Die Beanspruchung des Materials geschah am oberen Ende des entlasteten (!)[1]) Drahtes durch Drillen in folgender Weise: Zunächst wurde dieses um ca. zweimal 360° nach rechts, dann in die Ausgangslage, eben so viel nach links, schließlich wieder

[1]) Das Gewicht (rund 650 g) ruhte stets während der Zeit zwischen den Messungen, beim Tempern oder Beanspruchen der Drähte auf einem vertikal verstellbaren Tischchen. Während der Versuche waren die Drähte durch das Gewicht nur mit rund 0,5 kg pro qmm belastet, während die Tragkraft 2 kg pro qmm beträgt. Die Belastungszeit, gleichzeitig Dauer des Einzelversuches, betrug nur 3 Minuten.

in die Ausgangslage zurückgedreht. Darauf erfolgten in gleicher Weise nach rechts und nach links Torsionen um einmal 360°, 180°, 90°, endlich um 45°. Diese Art der Beanspruchung hatte sich als notwendig ergeben; denn nach einem Versuch, nur einmal und in einer Richtung zu tordieren, wanderte infolge elastischer Nachwirkung der Lichtzeiger in der umgekehrten Richtung so schnell über die photographische Platte, daß eine Aufnahme selbst einige Zeit nach der Beanspruchung ausgeschlossen war.

Die Temperung des hierbei stets entlasteten (!) Bleidrahtes erfolgte auf elektrischem Wege, indem man einen starken Strom

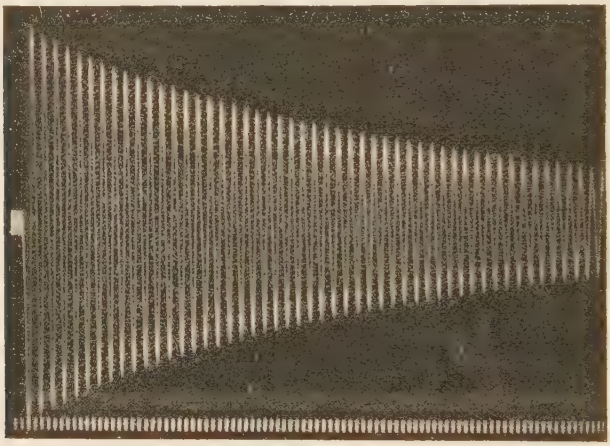


Fig. 33.

durch ihn sandte. Die Temperatur wurde geschätzt aus der Ablenkung eines Galvanometers, welches den Strom eines Thermoelementes anzeigte, das in ein winziges Loch im Bleidraht gesteckt war. Dieses Thermoelement, aus Kupfer-Konstantan von 0,1 mm Durchmesser, war vorher geeicht mit einem gleichen Bleidraht, der bis zum Schmelzen erhitzt worden war. Die Zuleitungsdrähte zum Thermoelement waren nur 0,1 mm dick und so lang, daß sie die Torsionsschwingungen nicht merklich zu beeinflussen vermochten. Für Temperaturkonstanz bei den Versuchen war durch Funktion des Thermoregulators (S. 30) natürlich Sorge getragen. Mit dieser einfachen, improvisierten Apparatur

gewann ich meine Aufnahmen (auf Eisenberger-Reformplatten 18×24 cm). s. Fig. 33 und 35. Die fertigen Platten mit ihrer Schichtseite auf Millimeterpapier gelegt und so die Amplituden gemessen.

Für unsere Zwecke kam es in erster Linie auf die Messung der Dämpfung an, von der wir nicht gewiß sind, daß sie durch die elastische Nachwirkung des Materials bedingt sei. Als Maß für dieselbe wurde die „Halbweite“ gewählt, d. i. die Anzahl der Schwingungen, die nötig ist, damit die Amplitude auf die Hälfte (immer von 120 mm auf 60 mm) sinkt.

Es sind zwei Drähte von dem gleichen Vorratsstück untersucht worden, beide ca. $^1/_2$ m lang und 1,2 mm dick. In den beiden folgenden Tabellen sind in der ersten Spalte die Zustände des Drahtes nach den an ihm vorgenommenen Operationen angegeben. Dann folgt die Nummer der Aufnahme, welche sich auf den Zustand bezieht, zuletzt die Halbweite der betreffenden Aufnahme.

Tabelle 1. Draht I.

Zustand des Drahtes	Aufnahme Nr.	Halbweite
Roh, nicht gerade gestreckt	1	15,5
Gestreckt durch 25 Min. langes Belasten	2	18
Getempert 12 Min. lang bis maximal ca. 260°	3	37
Durch Torsion beansprucht, wie oben beschrieben	4	40
Getempert 10 Min. lang bis maximal ca. 260°	5	37
Entlastet stehen gelassen ca. 20 Stdn.	6	71
Entlastet stehen gelassen weitere 25 Stdn.	7	81
Getempert 10 Min. lang bis maximal ca. 245°	8	42
Entlastet stehen gelassen 30 Min.	9	54
Tordiert wie vor Aufnahme 4	10	28,5
Getempert 7 Min. lang bis maximal ca. 270°	11	32
Entlastet stehen gelassen 20 Stdn.	12	61
Tordiert	13	29,5
Getempert 8 Min. lang bis maximal ca. 230°	14	39
Entlastet stehen gelassen 2 Stdn.	15	55
Belastet stehen gelassen $^1/_2$ Stde.	16	61
Beim neuen Tordieren am Thermoelement zerrissen!		

Tabelle 2. Draht II.

Ohne Thermoelement! Die Temperatur wurde nur aus der Stärke des Heizstromes durch den Draht geschätzt.

Zustand des Drahtes	Aufnahme Nr.	Halbweite
Roh, nicht gerade gestreckt	1	14,5
Getempert 10 Min. lang bei 150°—170°	2	25
Durch Torsion beansprucht	3	35,5
Belastet stehen gelassen 20 Min.	4	38
Entlastet stehen gelassen 22 Stdn.	5	48
Belastet stehen gelassen $^1/_2$ Stde.	6	51,5
Getempert 25 Min. lang bei ca. 200°	7	22,5
Entlastet stehen gelassen ca. 48 Stdn.	8	27

Beim nunmehrigen Tempern schon bei geringer Stromstärke durchgeschmolzen!

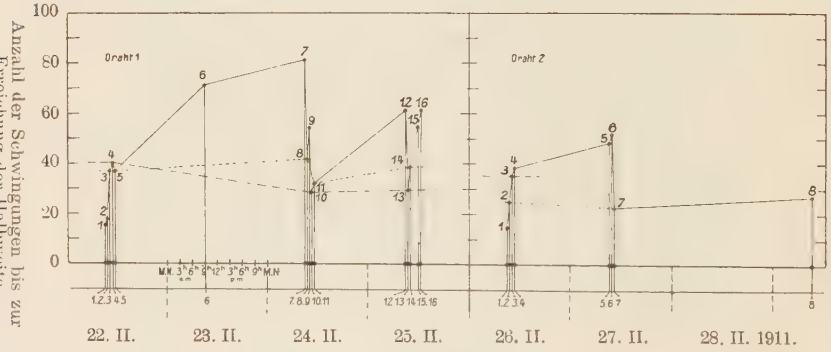


Fig. 34.

Das Resultat der Torsionsversuche ist in Fig. 34 graphisch zusammengestellt. Am rechten Rand ist als Maß für die Dämpfung die Anzahl der Schwingungen angegeben, die bis zur Erreichung der Halbweite verflossen; die Dämpfung wächst also in der Richtung fallender Zahlen. Unten befindet sich die Nummer der Aufnahme und das Datum. Um einen Überblick über die zeitliche Veränderung der Dämpfung zu ermöglichen, ist die Ordinatenachse nach Stunden geteilt. Die Halbweite der einzelnen Aufnahmen ist zeitlich an der richtigen Stelle als Abszisse nach links eingetragen. Außerdem findet sich in dem Diagramm noch eine ·····Linie, welche die Punkte miteinander

verbindet, die jedesmal nach einer Temperung erhalten wurden; eine ––––Linie ist durch die Punkte gezogen, welche sich nach einer Beanspruchung ergaben.

Bei der Betrachtung der graphischen Darstellung fallen sogleich folgende zwei Tatsachen in die Augen:

1. Durch jede Temperung sowohl (Draht I, Aufnahme 3, 5, 8, 11, 14; II : 2, 7) als auch durch jede Beanspruchung (I : 4, 10, 13; II : 3) wird der Draht immer wieder in einen Zwangszustand versetzt, dem eine bestimmte Größe der Dämpfung eigentümlich ist. Ob die Tatsache, daß in beiden Fällen diese Dämpfung von ziemlich der gleichen Größenordnung ist, einen tieferen Grund hat, oder ob sie lediglich auf Zufall beruht, war nicht zu ermitteln.

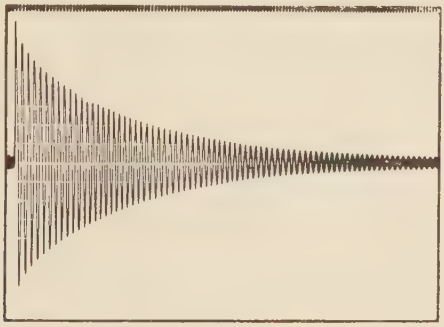


Fig. 35.

2. Dieser Zustand bleibt aber nicht bestehen, sondern in erstaunlich schneller Weise nimmt die Dämpfung (scheinbar „von selbst“) ab, wenn der (entlastete!) Draht bei Zimmertemperatur sich selbst überlassen bleibt. So z. B. steigt nach vorausgegangener Temperung die Halbweite schon in 30 Min. von 42 (Draht I: Aufnahme 8) auf 54 (I : 9), in 20 Stunden von 37 (I : 5) auf 71 (I : 6), nach weiteren 25 Stunden von 71 auf 81 (I : 7) und strebt anscheinend einem Grenzwert zu, dessen Ermittlung damals leider versäumt ist.

Nach vorausgegangener Beanspruchung fand sich nach 20 Min. ein Anwachsen der Halbweite von 35,5 (II : 3) auf 38 (II : 4), wobei allerdings der Draht durch das Torsionsgewicht belastet

war. Beim weiteren Stehen des nunmehr unbelasteten Drahtes ergab sich nach 22 Stunden eine Zunahme von 38 auf 48 (II : 5).

Diese Erscheinung, die schnelle Abnahme der Dämpfung, hat ohne Frage ihren Grund in einer außerordentlich schnell fortschreitenden strukturellen Umlagerung. Wenn ein solcher Draht, dessen Dämpfung im Laufe der Zeit abgenommen hat, nun wieder einer Temperung oder einer Beanspruchung unterworfen wird, so steigt seine Dämpfung für den Augenblick zwar auf den punktierten oder gestrichelten Wert, um jedoch in den nächsten Stunden wieder abzunehmen.

Wir sehen, daß wir bei den Biegungsversuchen diese schnellen Zustandsänderungen zu beobachten nicht in der Lage waren. Denn diese verliefen der Hauptsache nach gerade in der Zeit, in der die Apparate justiert und Temperaturkonstanz abgewartet werden mußte. Ob wir aber das hier gefundene Resultat auf die früheren Biegungsversuche übertragen dürfen, wollen wir wegen der schlechten Übereinstimmung der Versuche an Draht Nr. I u. II dahingestellt sein lassen.

Da die Vergleiche des Torsionsmoduls mit der Dämpfung nichts Wesentliches zutage förderten, soll sogleich zum Schluß übergegangen werden, in dem die erhaltenen Resultate zusammengefaßt sind.

Schluß.

Zusammenstellung der Resultate.

I. Es wurde ein Biegungsapparat konstruiert, mit welchem bei Temperaturen von $+100^{\circ}$ bis -185° C Biegungsversuche an Bleistäbchen vorgenommen wurden.
Wegen der Plastizität des Materials wurden die Stäbchen nur minimal belastet und ihr Biegungspfeil (einige tausendstel Millimeter) nach der Fizeauschen Methode mit Hilfe von Interferenzstreifen abgelesen.

II. Die Messungen mit diesem Apparat ergaben einen bedeutenden Temperatureinfluß auf die elastische Nachwirkung. Ihre auf S. 19, Fußnote definierte Größe nimmt ab auf ungefähr den 3. bezw. 5. Teil ihres Wertes bei

Zimmertemperatur bei der Temperatur des Kohlensäure-Alkoholgemisches bezw. der flüssigen Luft.

III. Sodann zeigte sich, daß die Größe der elastischen Nachwirkung verknüpft ist mit der Größe des Metallkornes. Je größer dieses ist, um so kleiner ist die Nachwirkung.

1. Bleistäbchen mit feinem Korn und mit bedeutender elastischer Nachwirkung sind solche, die vor den Biegungsversuchen erheblichen Deformationen (Beanspruchungen, Abdrehen beim Herstellen, Schneiden, Biegen) unterworfen waren.
2. Stäbchen mit grobem Korn und mit kleiner Nachwirkung werden aus jenen durch einen Temperprozeß (kurzes Erhitzen unter den Schmelzpunkt) oder länger dauerndes ruhiges Verweilen bei Zimmertemperatur erhalten, oder unmittelbar beim Abkühlen geschmolzenen Bleies.
3. Durch eine neue Deformation konnte wieder elastische Nachwirkung wachgerufen und ein feines Metallkorn erzielt werden.

IV. Blei mit feinkristallinischem Gefüge (deformiertes Blei) weist gegenüber jenem mit grobem Korn (getempertes oder gegossenes Blei) eine um rund 0,05 $^0/_{00}$ größere Dichte auf.

V. Bei Torsionsversuchen wurde hinsichtlich der Dämpfung ein bestimmter Wert dieser Größe beobachtet unmittelbar nach jedem Eingriff, und zwar schien es, als ob nach dem Tempern sowie Deformieren sich die gleiche Größe der Dämpfung einstellte.

Beim darauffolgenden Stehenbleiben bei Zimmertemperatur nimmt die Dämpfung fortgesetzt ab, eine Erscheinung, die ihren Grund in einer schnell mit der Zeit fortschreitenden Strukturänderung haben dürfte.

Robert Noske, Borna-Leipzig, Großbetrieb für Dissertationsdruck.

Lebenslauf.

Ich bin am 21. Mai 1883 in Neuwied a. Rh. als Sohn des Sanitätsrates Dr. med. Paul Knipping geboren. Ich besuchte die Gymnasien zu Neuwied und Trarbach a. d. Mosel und erhielt Ostern 1904 das Reifezeugnis. Darauf widmete ich mich den Naturwissenschaften in Heidelberg — wo ich im Laboratorium des Herrn Prof. Krafft ein Jahr lang chemischen Studien oblag — und in München. Hier begann ich unter Leitung des Herrn Geh. Rates Prof. Dr. W. C. Röntgen, Exzellenz, im Jahre 1906 mit praktischen physikalischen Arbeiten und führte auch die vorliegende Untersuchung aus. Es sei mir an dieser Stelle gestattet, demselben für seine Anregungen und Unterstützungen den gebührenden Dank auszusprechen.

Paul Knipping.